



Risco Sísmico no Algarve - Implicações devidas à avaliação da perigosidade sísmica

Liliana Caria Oliveira

Mestrado em Ciências Geofísicas
Geofísica Interna

Dissertação orientada por:
Dr.^a Alexandra Maria Rodrigues de Carvalho
Prof.^a Dr.^a Maria Paula Pompeu de Miranda Rodrigues de Teves Costa

Aos que fazem parte de mim.

A ciência é o querer adaptar o menor sonho ao maior.

Fernando Pessoa

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus Pais, pois sem eles esta jornada não seria possível. Sou profundamente grata pelo amor e apoio incondicional que sempre me deram ao longo de toda a minha vida e por orgulhosamente me lançarem rumo aos meus sonhos.

Aos meus Tios por serem tão dedicados no apoio e motivação, por se interessarem tão genuinamente pelo que faço e por me enriquecerem a alma e o coração todos os dias.

Aos meus avós, que infelizmente já partiram, que são parte de mim. Obrigada por todos os ensinamentos e por ajudarem, com tanto amor e carinho, a formar quem sou.

A realização deste trabalho, intitulado *Risco Sísmico no Algarve – Implicações devidas à avaliação da perigosidade sísmica*, desenvolvido no Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas (NESDE) inserido no Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), no âmbito da obtenção do grau de mestre em Ciências Geofísicas - Especialização em Geofísica Interna, só foi possível graças ao maravilhoso acolhimento por parte desta instituição e à contribuição de diversas pessoas a quem deixo os meus sinceros agradecimentos.

Quero exprimir o meu especial obrigada à minha orientadora, Doutora Alexandra Maria Rodrigues de Carvalho, pelo caloroso acolhimento e integração na instituição, pela partilha de conhecimentos que tanto contribuíram para o enriquecimento da minha bagagem científica e por todo o apoio e disponibilidade sem nunca esquecer todos os motivos para uma boa gargalhada quando a altura era de extrema tensão.

À Professora Doutora Maria Paula Pompeu de Miranda Rodrigues de Teves Costa, minha coorientadora, por me acompanhar desde os primeiros tempos, por toda a sabedoria que me transmitiu e por confiar e apostar em mim. Obrigada pela disponibilidade, pelas ideias e palavras, pelo apoio e força e, sobretudo, pela preocupação.

À Técnica Superior Anabela Martins por todo o apoio e dedicação em momentos fulcrais desta jornada.

Agradeço também à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) por me ter acolhido há cinco anos e a todos os docentes, investigadores e não-docentes que cruzaram o meu caminho e me transmitiram um amor maior pela Ciência, pelo Mundo e pela Vida. Obrigada também por ter proporcionado que pessoas maravilhosas cruzassem o meu percurso.

Um último, mas igualmente gigantesco, obrigada aos melhores amigos que poderia alguma vez desejar e que deixam a minha vida tão mais colorida quando o seu céu tenta mostrar-se sombrio. Em especial à Daniela, por caminhar a meu lado ao longo destes cinco anos, pelos momentos e carinho, pela pessoa incrível que é, e à Rita, por tudo o que há tanto nos uniu e por cultivarmos uma amizade tão genuína. À Susana, Ricardo, Bárbara, Diogo, Miguel, Frederico, Jhon, Paulo, Neff e afilhados, Nuno, Inês, Beatriz, Maria Inês, José e Carolina, pela inspiração, apoio e carinho, por nunca deixarem que baixasse os braços e por sempre acreditarem em mim.

Que façam sempre parte da minha vida. Eternamente grata.

Resumo

Ao longo dos últimos séculos, a região do Algarve foi vitimada por diversos sismos que trouxeram avultados prejuízos materiais e elevadas perdas humanas. Os sismos são frequentemente vistos como desastres naturais inevitáveis. No entanto, estes deveriam ser considerados fenómenos naturais, cujos efeitos adversos podem ser minimizados caso se proceda a uma gestão efetiva do risco sísmico.

O risco sísmico define-se pela conjugação de três fatores: a perigosidade, a exposição e a vulnerabilidade. Em estudos probabilísticos para avaliação da perigosidade sísmica e, posteriormente, do risco sísmico, são estabelecidas zonas sismogénicas – regiões que partilham as mesmas características sismológicas, tectónicas e geológicas – caracterizadas por uma relação entre a frequência com que aí ocorrem os sismos e as respetivas magnitudes, num dado período de tempo.

No seio da comunidade científica encontram-se propostos três modelos distintos de zonas sismogénicas para Portugal continental: o primeiro resultou da elaboração dos Anexos Nacionais do Eurocódigo 8 (EC8), adaptado de estudos prévios realizados em 1996, o segundo surgiu no âmbito do projeto Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve (ERSTA) e o terceiro resultou de um projeto europeu, que decorria em simultâneo com o projeto ERSTA, *Seismic Hazard Harmonization in Europe* (SHARE). Estas diferentes propostas deram origem a diferentes mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental. As diferenças encontradas, principalmente para a região sul de Portugal, inquietaram a comunidade científica, o que motivou um apelo da mesma a uma maior e mais dedicada investigação.

É neste âmbito que surge este trabalho, que tem como objetivo compreender as diferenças observadas nos mapas de perigosidade sísmica e estudar o seu impacto nas estimativas do risco sísmico para a região sul de Portugal. Consideraram-se os três modelos de zonas sismogénicas propostos (perigosidade), o parque habitacional do Algarve (exposição) e as diferentes tipologias construtivas presentes nesta região (fragilidade), de forma a estimar o risco sísmico. Utilizou-se um recente software denominado OpenQuake, para o cálculo da perigosidade sísmica e o Simulador de Cenários Sísmicos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC Loss) para a avaliação do risco sísmico.

Palavras-chave: Risco Sísmico, Perigosidade Sísmica, Vulnerabilidade, Exposição, Algarve.

Abstract

Over the past few centuries, the Algarve region has been struck by several earthquakes that have produced heavy material losses and high human losses. Earthquakes are often seen as inevitable natural disasters. However, these should be considered natural phenomena, the adverse effects of which can be minimized by effective seismic risk management.

Seismic risk is defined by the combination of three factors: hazard, exposure and vulnerability. In probabilistic studies for the evaluation of seismic hazard and, subsequently, seismic risk, seismogenic zones are defined - regions that share the same seismological, tectonic and geological characteristics - characterized by a relation between the frequency with which earthquakes occur and their respective magnitudes for a given period of time.

In recent years, the scientific community proposed three different models of seismogenic zones for mainland Portugal: the first one resulted from the elaboration of the Portuguese Annex of Eurocode 8 (EC8), adapted from previous studies carried out in 1996, the second one emerged within the framework of the project *Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis no Algarve* (ERSTA) and the third was the result of a European project, which took place simultaneously with the ERSTA project, Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE). These different proposals results in different seismic hazard maps for mainland Portugal. The differences found, mainly in the southern region of Portugal, worried the scientific community, which motivated a call for greater and more dedicated research.

It is within this scope that this work has been developed, aiming to understand the differences observed in seismic hazard maps and to study their impact on seismic risk estimations for the southern region of Portugal. The three models of proposed seismogenic zones (hazard), the Algarve housing stock (exposure) and the different construction typologies present in this region (fragility) were considered to estimate the seismic risk. The recent developed software OpenQuake was used to calculate the seismic hazard and the evaluation of the seismic risk was obtained using the Seismic Scenarios Simulator of the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC Loss).

Keywords: Seismic Risk, Seismic Hazard, Vulnerability, Exposure, Algarve.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Lista de Acrónimos e Abreviaturas	xix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Motivação	3
1.3. Objetivos	3
1.4. Estrutura da dissertação	4
2. Características regionais	5
2.1. Enquadramento geodinâmico e geotectónico da região	5
2.2. Sismicidade regional	7
3. Estado de Arte	11
3.1. Conceitos teóricos	11
3.1.1. Perigosidade sísmica	11
3.1.2. Vulnerabilidade e Fragilidade sísmicas	15
3.1.3. Exposição	17
3.1.4. Risco Sísmico	18
3.2. Estudos prévios	20
4. Compilação dos parâmetros de base	23
4.1. Modelos de zonas sismogénicas	23
4.1.1. Modelo EC8	23
4.1.2. Modelo ERSTA	25

4.1.3.	Modelo SHARE.....	27
4.2.	Leis de atenuação	29
4.3.	Exposição	30
4.4.	Vulnerabilidade sísmica do parque habitacional.....	34
4.5.	Curvas de fragilidade sísmica	36
5.	Metodologia.....	39
5.1.	OpenQuake.....	39
5.1.1.	Modelo de cálculo.....	41
5.1.2	Ficheiros de input	41
5.1.3	Principais outputs	41
5.2.	LNECLoss.....	42
6.	Resultados e Discussão	45
6.1.	Validação.....	45
6.2.	Resultados	46
6.3.	Discussão.....	65
7.	Conclusões	71
	Referências	73
	Anexos.....	81
	A. Mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos	83
	B. Mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental para uma probabilidade de excedência de 2% em 50 anos	89

Lista de Figuras

Figura 1.1: Problemática do tema. Zonamento sísmico obtido para o Eurocódigo 8, à esquerda (adaptado de NP EN 1998-1, 2010), e mapa de perigosidade sísmica para a Europa resultante do projeto SHARE, à direita (adaptado de Giardini et al., 2013).	2
Figura 2.1: (A) Enquadramento geotectónico de Portugal continental. A área demarcada a vermelho corresponde à região apresentada em (B); (B) Enquadramento geodinâmico regional da região do Algarve. 1, crosta oceânica; 2, crosta continental adelgada; 3, colisão continental; 4, fronteira de placas difusa; 5, limite de placa (localização aproximada); 6, zona de subducção incipiente ao longo da margem continental SW Ibérica; 7, dobra antiforma ativa; 8, falha ativa; 9, falha ativa provável; 10, falha de desligamento; 11, falha inversa; 12, falha normal; 13, batimetria em km; Go, Banco de Gorringe; Gq, Banco de Guadalquivir; P.A.Ib., Planície Abissal Ibérica; P.A.T., Planície Abissal do Tejo; A, Algarve (adaptado de Terrinha et al., 2006).....	7
Figura 2.2: Mapa da distribuição de epicentros de sismos instrumentais, na região do Algarve e áreas adjacentes, no período 1961-2003 (Carrilho, 2005) e das principais falhas ativas atualmente identificadas na região do Algarve (zona emersa e imersa). Área imersa: vermelho, falhas ativas no Holocénico; castanho, falhas ativas cegas; azul, componente extensional mesozoica; castanho tracejado, falhas ativas no Pliocénico ou inferidas. Área emersa: cheio, falhas reconhecidas no campo; tracejado, inferidas.....	9
Figura 2.3: Carta de intensidades máximas (IPMA, 2016).....	10
Figura 3.1: Etapas da análise probabilística do risco sísmico (Kramer, 1996).....	14
Figura 3.2: Curvas de fragilidade para os estados de dano Ligeiro, Moderado, Severo e Total (adaptado de Sousa, 2006).....	17
Figura 3.3: Componentes do risco sísmico e respetivos aspetos a considerar na sua avaliação.	19
Figura 4.1: Mapa epicentral e delimitação das zonas sismogénicas consideradas no Modelo EC8 (adaptado de Sousa, 1996).	24
Figura 4.2: Mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos: Tipo 1 – ambiente tectónico oceânico (offshore); Tipo 2 – ambiente tectónico continental (inland) (adaptado de Campos Costa et al., 2008).....	25
Figura 4.3: Zonas sismogénicas consideradas no projeto ERSTA (A a P) (Carrilho, F. et al., 2010) e complementadas por outros estudos locais (Z1 a Z4) (Jeremias, F., et al., 2012) (adaptado de Carvalho e Malfeito, 2016).....	26
Figura 4.4: Zonas sismogénicas para Portugal continental, propostas no âmbito do projeto SHARE (Carvalho e Malfeito, 2016).....	27

Figura 4.5: Mapa de perigosidade sísmica para a Europa para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, proposto pelo modelo SHARE (Giardini et al., 2013).	28
Figura 4.6: Distribuição dos edifícios do parque habitacional do Algarve e pelas classes de vulnerabilidade Censos 2011.	32
Figura 4.7: Distribuição das classes de vulnerabilidade sísmica pelo parque habitacional do Algarve, com base nos Censos 2011 e segundo as Tipologias FEMA & NIBS (ATAPS = Adobe, Taipa e Alvenaria de Pedra Solta, BA = Betão Armado).	34
Figura 4.8: Densidade de edifícios na região do Algarve, segundo os Censos 2011.....	34
Figura 4.9: Distribuição das tipologias construtivas presentes no parque habitacional do Algarve, de acordo com a classificação FEMA & NIBS.	35
Figura 4.10: Exemplo de curvas de capacidade, fragilidade e limiares de estados de dano da tipologia “ATAPS + Outros” com 1 pavimento (Campos Costa et al., 2005).	37
Figura 5.1: Diagrama do funcionamento da plataforma OpenQuake (adaptado de Pagani et al., 2014).	40
Figura 5.2: Fluxograma do Simulador de Cenários Sísmicos. As opções 1, 2, 3 e 4 representam as definições iniciais do evento sísmico (Campos Costa et al., 2004).	42
Figura 6.1: Mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, com base nas zonas sismogénicas e respetivos parâmetros obtidas no âmbito do modelo EC8.	46
Figura 6.2: Mapas de perigosidade sísmica para o Algarve para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, com o Modelo EC8 com a Hipótese 1 (Ambraseys et al. (1996) para ambiente tectónico continental e Carvalho (2007) para ambiente tectónico oceânico), Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico) e Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	47
Figura 6.3: Mapas de perigosidade sísmica para o Algarve para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, com o Modelo ERSTA com a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico) e Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	48
Figura 6.4: Mapas de perigosidade sísmica para o Algarve para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, com o Modelo SHARE com a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico) e	

Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	49
Figura 6.5: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo EC8 e Leis de Atenuação da Hipótese 1 (Ambraseys et al. (1996) para ambiente tectónico continental e Carvalho (2007) para ambiente tectónico oceânico) de acordo com a Tabela 4.4.....	50
Figura 6.6: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo EC8 e Leis de Atenuação da Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico) de acordo com a Tabela 4.4.	51
Figura 6.7: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo EC8 e Leis de Atenuação da Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	52
Figura 6.8: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo ERSTA e Leis de Atenuação da Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.....	53
Figura 6.9: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo ERSTA e Leis de Atenuação da Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	54
Figura 6.10: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo SHARE e Leis de Atenuação da Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.....	55
Figura 6.11: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo SHARE e Leis de Atenuação da Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	56
Figura 6.12: Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, M_{min} , e máximo, M_{max} , da magnitude máxima), para a zona do Golfo de Cádiz (Carvalho e Malfeito, 2017).....	57
Figura 6.13: Mapas de perigosidade sísmica para o Algarve para uma probabilidade de excedência de 2% em 50 anos, com o Modelo ERSTA com a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico) e Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.....	59
Figura 6.14: Mapas de perigosidade sísmica para o Algarve para uma probabilidade de excedência de 2% em 50 anos, com o Modelo SHARE com a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003)	

para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico) e Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.....	60
Figura 6.15: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo ERSTA e Leis de Atenuação da Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.....	61
Figura 6.16: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo ERSTA e Leis de Atenuação da Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	62
Figura 6.17: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo SHARE e Leis de Atenuação da Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.....	63
Figura 6.18: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo SHARE e Leis de Atenuação da Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	64
Figura 6.19: Rácio entre os modelos ERSTA/SHARE para as Hipóteses 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico) e 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico) das leis de atenuação (Tabela 4.4) para um período de retorno de 475 anos.	68
Figura 6.20: Rácio entre os modelos ERSTA/SHARE para as Hipóteses 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico) e 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico) das leis de atenuação (Tabela 4.4) para um período de retorno de 2475 anos.	69
Figura A.1: Mapa de perigosidade sísmica com o modelo EC8 e a Hipótese 1 (Ambraseys et al. (1996) para ambiente tectónico continental e Carvalho (2007) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.....	85
Figura A.2: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo EC8 e a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	86

Figura A.3: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo EC8 e a Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	86
Figura A.4: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo ERSTA e a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	87
Figura A.5: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo ERSTA e a Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	87
Figura A.6: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo SHARE e a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	88
Figura A.7: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo SHARE e a Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	88
Figura B.1: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo ERSTA e a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	91
Figura B.2: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo ERSTA e a Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	91
Figura B.3: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo SHARE e a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao et al. (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	92
Figura B.4: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo SHARE e a Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues et al. (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.	92

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Sismos que mais afetaram a região do Algarve (adaptado de Catálogo LNEC, 1996).....	8
Tabela 4.1: Parâmetros definidores das zonas sísmicas consideradas no modelo EC8 (Carvalho e Malfeito, 2016).	24
Tabela 4.2: Parâmetros definidores das zonas sismogénicas consideradas no modelo ERSTA (Carvalho e Campos Costa, 2015).....	26
Tabela 4.3: Parâmetros definidores das zonas sismogénicas consideradas no modelo SHARE (Carvalho e Malfeito, 2016).....	28
Tabela 4.4: Leis de atenuação consideradas para o cálculo da perigosidade sísmica.....	29
Tabela 4.5: Quantitativos de edifícios por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos, de acordo com o Censos 2011.....	31
Tabela 4.6: Classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional apurado nos Censos 2001 de acordo com as tipologias FEMA & NIBS (Sousa, 2006).....	33

Lista de Símbolos

a ou a_k	Ordenada da lei de Gutenberg-Richter, da zona de geração k , para $M = 0$
b ou b_k	Declive da lei de Gutenberg-Richter da zona de geração k
C_1 a C_9	Coefficientes de ajuste das relações preditivas
D, d	Nível, grau ou estado de dano
E	Exposição dos elementos ao risco
f_{fonte}	Características da fonte sismogénica
f_{local}	Características do local
H	<i>Hazard</i> ou perigosidade
k	Índice da zona de geração sísmica
M, m ou M_L	Magnitude do sismo
m_0 ou m_{0k}	Limite inferior de truncatura da lei de Gutenberg-Richter, para a zona de geração k
M_{max}	Magnitude máxima característica da zona sismogénica
$M_{max,min}$	Valor mínimo aceite para o parâmetro M_{max}
$M_{max,max}$	Valor máximo aceite para o parâmetro M_{max}
$M_{max,med}$	Valor médio do parâmetro M_{max}
m_{max} ou m_{maxk}	Limite superior de truncatura da lei de Gutenberg-Richter, para a zona de geração k
$N(m)_k$	Número de sismos com magnitude maior ou igual a m que ocorre na região analisada, para um dado período de observação
P	Conjunto de variáveis que caracteriza a fonte e/ou o local em análise
P_d	Probabilidade de um ativo se encontrar num determinado estado de dano d
R	Distância entre a fonte e o local em análise
R_S	Risco sísmico
S_a ou SA	Aceleração espectral
S_d ou SD	Deslocamento espectral
SD_{max}	Deslocamento espectral no ponto de resposta máxima

S_v	Velocidade espectral
T	Período de retorno
V	Vulnerabilidade dos elementos expostos ao risco
X	Vetor de variáveis que influenciam Y
Y	Intensidade do movimento do solo
y^*	Valor excedido por Y (aplicação do Teorema da Probabilidade Total)
α_k	Produto de a_k por $\ln(10)$
β_k	Produto de b_k por $\ln(10)$
$\sigma_{\ln Y}$	Incerteza do parâmetro do movimento do solo Y (desvio padrão)
\otimes	Operação de convolução

Lista de Acrónimos e Abreviaturas

ACP	Alvenaria com Placa
ANCP	Autoridade Nacional de Proteção Civil
ASP	Alvenaria sem Placa
ATAPS	Adobe, Taipa e Alvenaria de Pedra Solta
BA	Betão Armado
DTCCFR	Distrito, Concelho, Freguesia
EC8	Eurocódigo 8
EMS-98	Escala Macrossísmica Europeia de 1998
ERSTA	Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
FEMA & NIBS	<i>Federal Emergency Management Agency & National Institute of Building Sciences</i>
GEM	<i>Global Earthquake Model</i>
GMPE	<i>Ground Motion Prediction Equation</i>
GSHAP	<i>Global Seismic Hazard Assessment Program</i>
HAZUS99	<i>Hazard in the United States (Earthquake Loss Estimation Methodology)</i>
IMM	Intensidade de Mercalli Modificada
INE	Instituto Nacional de Estatística
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
LESSLOSS	<i>Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides (Project)</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNECLoss	Simulador de Cenários Sísmicos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NERA	<i>Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation (Project)</i>
NESDE	Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas
DSHA	<i>Deterministic Seismic Hazard Analysis</i>
PGA	<i>Peak ground acceleration</i>

PGD	<i>Peak ground displacement</i>
PGV	<i>Peak ground velocity</i>
PRISE	<i>Earthquake loss assessment of the Portuguese building stock (Project)</i>
PSHA	<i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i>
RISK-UE	<i>European Project: An advanced approach to earthquake risk scenarios, with applications to different European towns</i>
RSA	Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes
SA	<i>Spectral acceleration</i>
SCS	Simulador de Cenários Sísmicos
SD	<i>Spectral displacement</i>
SHARE	<i>Seismic Hazard Harmonization in Europe (Project)</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SNPC	Serviço Nacional de Proteção Civil
SPES	Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica
SV	<i>Spectral velocity</i>
Syner-G	<i>Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain (Project)</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1. Enquadramento do tema

A avaliação do risco sísmico tem sido protagonista de um crescente interesse e alvo de um vasto número de estudos ao longo das últimas décadas por todo o mundo. Esta avaliação é essencial na definição de estratégias de planeamento urbano, de mitigação do risco e da criação de planos de emergência, principalmente em regiões caracterizadas por uma sismicidade moderada a elevada.

O risco sísmico é avaliado tendo em conta as perdas esperadas que os elementos de uma dada região sofrerão, como resultado de sismos futuros, e pela probabilidade dessas mesmas perdas ocorrerem para um certo período de tempo de exposição. Este depende essencialmente de três fatores (Sousa, 2006):

- i) da perigosidade sísmica que traduz a intensidade da ação sísmica, que é função da energia libertada na fonte, da distância do sítio ou sistema construído à fonte e das características do solo no local onde este se encontra implantado;
- ii) da exposição, que se traduz pela existência de elementos expostos ao risco sísmico e respetiva distribuição geográfica;
- iii) da vulnerabilidade sísmica dos elementos expostos que se encontra relacionada com as características das estruturas, dos elementos não estruturais, bem como do processo construtivo.

Através da conjugação destas três grandezas, é possível compreender o quanto um edifício, uma cidade ou até mesmo um país está sujeito aos efeitos da ação sísmica e que a variação de qualquer um dos três fatores supramencionados condiciona a severidade do risco sísmico (Vicente, 2008). Por exemplo, se for considerada uma dada região sujeita a sismos intensos, mas que é escassamente habitada, esta terá um risco sísmico reduzido, o que não acontecerá se forem consideradas regiões diferentes com exposição semelhante e sujeitas a sismos da mesma severidade, visto que estas apresentarão riscos tanto mais elevados quanto mais vulneráveis forem as estruturas nelas existentes (Sousa *et al.*, 2000).

A análise da perigosidade sísmica para uma determinada região envolve uma estimativa quantitativa da perigosidade do movimento do solo nessa mesma região. Esta pode ser analisada de uma forma determinista, quando é assumido um cenário sísmico particular, ou probabilista quando são consideradas explicitamente as incertezas associadas à magnitude sísmica, à localização, e ao período de ocorrência (Maia, 2011). No caso dos estudos probabilísticos são estabelecidas zonas sismogénicas, que representam regiões que partilham as mesmas características sismológicas, tectónicas e geológicas. Para cada zona é definida a relação entre a frequência, com que aí ocorrem os sismos, e as respetivas magnitudes, num dado período de tempo.

Em 2006, para elaboração dos Anexos Nacionais do Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2010), foram consideradas e caracterizadas 11 zonas sismogénicas para Portugal continental, adaptadas de estudos previamente elaborados em 1996, que deram origem a um zonamento sísmico para o território português. No ano de 2008, no âmbito do projeto ERSTA - Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve, promovido pela Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC), o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) procedeu à revisão do catálogo sísmico. Esta revisão, aliada aos estudos de neotectónica desenvolvidos no âmbito do projeto, permitiu redesenhar e propor novas zonas sismogénicas, para as quais foram estimados os respetivos parâmetros da lei de frequência – magnitude (lei de Gutenberg-Richter). Paralelamente ao projeto ERSTA decorria o projeto europeu SHARE - *Seismic Hazard Harmonization in Europe* (2009-2013), no âmbito do qual foram propostas outras zonas sismogénicas e estipuladas as respetivas taxas de atividade e distribuição de magnitudes. Este projeto permitiu a elaboração de um mapa de perigosidade sísmica para toda a Europa.

Das propostas resultantes do Eurocódigo 8 e do Projeto SHARE, juntamente com as opções tomadas para as equações de previsão dos movimentos do solo, resultaram diferentes mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental (Figura 1.1) que, no caso do Eurocódigo 8, deu origem ao zonamento sísmico que é hoje aceite para o território continental. A perigosidade é uma das componentes do risco sísmico, pelo que diferentes expressões desta componente, em conjunto com as duas outras componentes, vulnerabilidade ou fragilidade e exposição, pode levar a diferentes avaliações do risco sísmico de uma determinada região. Tal facto deixou a comunidade científica em alerta e consciente de que é necessário um consenso quanto à expressão da perigosidade sísmica ao nível do território continental.

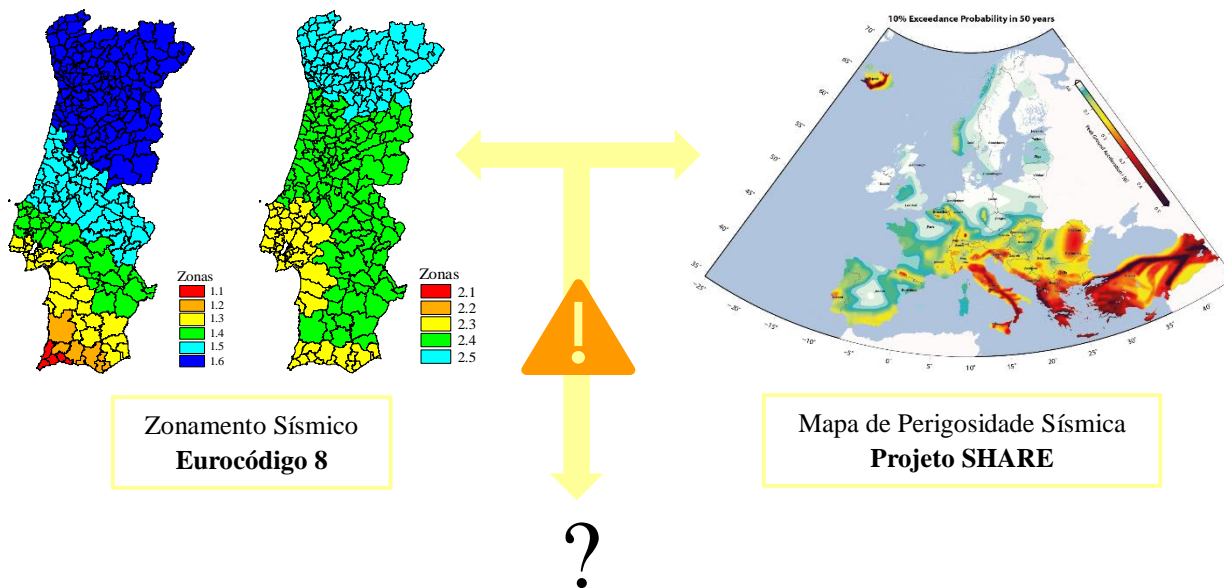


Figura 1.1: Problemática do tema. Zonamento sísmico obtido para o Eurocódigo 8, à esquerda (adaptado de NP EN 1998-1, 2010), e mapa de perigosidade sísmica para a Europa resultante do projeto SHARE, à direita (adaptado de Giardini *et al.*, 2013).

1.2. Motivação

A SPES, Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica, foi o rosto da inquietude existente na comunidade científica face às diferentes expressões da perigosidade sísmica em Portugal, resultantes dos modelos propostos detentores de características distintas. Consciente da necessidade de um consenso perante os agentes decisores, considerou urgente a realização de um estudo criterioso acerca das opções tomadas, nos diferentes estudos, e suas implicações. Assim, o primeiro estudo foi realizado por Carvalho e Malfeito (2016), em que é feita uma análise crítica dos resultados obtidos nos diferentes estudos e das suas implicações, ao nível dos períodos de retorno, para sismos de maior magnitude. Foram constatadas diferenças significativas, principalmente para as zonas sismogénicas a sudoeste de Portugal.

Uma das variáveis constituintes da convolução aplicada para a obtenção do risco sísmico é a perigosidade sísmica. Deste modo, é de elevado interesse entender qual a sua influência na avaliação do risco sísmico de uma dada região. Foi esta questão que motivou a proposta e realização deste trabalho. Pretende-se perceber até que ponto as diferenças encontradas nos mapas de perigosidade sísmica obtidos pelos três projetos supramencionados têm impacto nas estimativas de risco sísmico para a região do Algarve. Esta é uma das regiões do país que mostra diferenças mais significativas ao nível da perigosidade sísmica, o que levou a que fosse o foco deste estudo, além da região do Vale do Tejo e região Metropolitana de Lisboa que também apresentam diferenças alarmantes.

1.3. Objetivos

O objetivo final do presente trabalho consiste na compreensão do impacto das diferenças observadas nos mapas de perigosidade sísmica obtidos pelos diferentes projetos nas avaliações de risco sísmico para a região do Algarve.

De forma a alcançar o objetivo pretendido, foi definido um plano de trabalhos composto por diferentes etapas, que a seguir se enumeram:

1. Apuramento dos quantitativos do parque habitacional do Algarve e respetiva distribuição geográfica com base no V Recenseamento Geral da Habitação (Censos 2011), realizado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) em 2011 (INE, 2012), e classificação daquele segundo as tipologias construtivas presentes na metodologia FEMA & NIBS (1999), de modo a obter um modelo de exposição;
2. Caracterização da fragilidade sísmica das tipologias construtivas, através de curvas de fragilidade documentadas (Campos Costa *et al.*, 2005);
3. Seleção de diferentes leis de atenuação de forma a testar a sua possível influência nos resultados;
4. Cálculo da perigosidade sísmica obtida a partir dos três modelos propostos para probabilidades de excedência de 10% em 50 anos (nível que corresponde ao período de retorno geralmente usado para a avaliação da perigosidade e risco sísmico) e de 2% em 50 anos e obtenção de curvas de perigosidade sísmica, recorrendo ao *software* OpenQuake;
5. Cálculo do risco sísmico, para as mesmas probabilidades de excedência, com recurso ao Simulador de Cenários Sísmicos (LNECLoss) e posterior análise das implicações das decisões tomadas *à priori* quando da realização dos modelos.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente Dissertação de Mestrado encontra-se organizada em sete capítulos.

No Capítulo 1 faz-se o enquadramento geral do tema, apresenta-se a sua motivação, dá-se a conhecer os objetivos do estudo a desenvolver, bem como a fonte dos dados utilizados no mesmo e, por fim, descreve-se a estrutura organizativa adotada.

No Capítulo 2 é apresentada uma caracterização regional em que se faz um enquadramento geodinâmico e geotectónico da região do Algarve e uma abordagem à sua sismicidade, de modo a compreender como é que esta região tem sido afetada pelos eventos sísmicos ocorridos ao longo dos tempos. Esta caracterização é inserida numa abordagem mais ampla, ou seja, ao nível de Portugal continental.

O Capítulo 3 aborda os conceitos teóricos presentes na análise do risco sísmico, como a perigosidade sísmica, a vulnerabilidade, a fragilidade, a exposição e o próprio risco sísmico e também contempla uma revisão de estudos prévios de perigosidade e risco sísmico.

No Capítulo 4 são apresentados os dados utilizados neste estudo: modelos de zonas sismogénicas, leis de atenuação, modelo de exposição e curvas de fragilidade.

No Capítulo 5 é apresentada a metodologia utilizada: uma breve descrição do funcionamento do *software* OpenQuake e como foi aplicado neste estudo e também do Simulador de Cenários Sísmicos (LNECloss).

No Capítulo 6 são apresentados os resultados do estudo e feita uma análise crítica aos mesmos.

No último capítulo, Capítulo 7, são apresentadas as principais conclusões obtidas e perspetivam-se os desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Características regionais

A caracterização regional do Algarve não pode ser feita sem antes enquadrarmos Portugal continental numa região geotectónica tão característica do globo.

Portugal continental encontra-se localizado próximo da fronteira de placas Eurásia–África, um ambiente tectónico responsável por uma significativa atividade neotectónica e sísmica (Cabral, 1993). A evolução geodinâmica regional é dominada por uma convergência lenta, cerca de 2 mm/ano, das placas euro-asiática e africana na direção NNW-SSE para NW-SE ao longo do segmento leste da fronteira de placas Açores-Gibraltar. O contacto entre estas duas placas constitui a principal fonte de tensão que influencia a sismicidade no território de Portugal continental, localizado a norte da referida zona (Senos e Carrilho, 2003).

No entanto, não é só no mar e junto ao litoral que os sismos sentidos em Portugal continental têm a sua origem. O território nacional também alberga um conjunto de estruturas possivelmente responsáveis pela origem de sismos. Considerando que a margem continental oeste-ibérica corresponde a uma margem passiva, a sismicidade ocorrida no interior do continente e na zona imersa próxima do litoral deve ter origem em falhas ativas no interior da placa litosférica euro-asiática, correspondendo à sismicidade intraplaca (Cabral, 1995). No interior do território continental são identificadas falhas ativas, algumas com extensão para o mar, correspondendo a zonas de geração sísmica importantes, nomeadamente a falha do Vale Inferior do Tejo, a falha de Portimão, a falha de Loulé, a falha de Nazaré e a falha da Vilariça. De uma forma geral, a sismicidade no nosso país aumenta de intensidade de norte para sul.

Situado no extremo Oeste da Península Ibérica, no Sul de Portugal, o Algarve é facilmente distinto do resto do país, não apenas devido à sua localização periférica, mas também pelas suas características morfológicas e geológicas. Considerando a proximidade desta região à fronteira de placas Eurásia-África, o Algarve também se destaca por outra razão: apresenta uma perigosidade sísmica elevada associada a um risco sísmico potencialmente elevado.

2.1. Enquadramento geodinâmico e geotectónico da região

A região do Algarve constitui a zona mais meridional de Portugal continental, localiza-se no extremo sudoeste da parte continental da placa Eurasiática e forma, conjuntamente com o sudoeste de Espanha, o limite norte do Golfo de Cádiz. Esta região encontra-se junto à intersecção de dois importantes elementos litosféricos: a margem continental oeste-ibérica, de direção aproximada N-S, relacionada com a abertura do Atlântico Norte, tradicionalmente considerada passiva, mas que se encontra provavelmente em transição para uma margem ativa convergente, e o setor oriental da Zona de Fratura Açores-

Gibraltar, que corresponde a uma zona de fronteira de placas entre a placa Eurasiática e a placa Africana, disposta segundo uma direção geral E-W (Figura 2.1) (Dias e Cabral, 2002).

A parte oriental da Zona de Fratura Açores-Gibraltar, entre o monte submarino de Gorringe e o arco orogénico de Gibraltar, que corresponde ao limite de placas acima referido, permaneceu uma incógnita durante décadas até que a comunidade científica uniu forças em busca de uma caracterização tectónica deste limite de placas, o que permitiu o mapeamento das estruturas tectónicas da região e novas propostas sobre a natureza deste limite e, apesar de ainda controverso, com soluções tectónicas baseadas em estruturas reconhecidas e mapeadas.

Vários autores apresentaram propostas de diferentes tipos de limites litosféricos para explicar a natureza da fronteira de placas Eurásia-África. Sartori *et al.* (1994) descreveram este limite como uma zona de deformação distribuída a sul do monte submarino de Gorringe, Gutscher *et al.* (2002) propuseram a existência de uma subducção ativa sob o arco de Gibraltar e Zitellini *et al.* (2009) propuseram um limite transpressivo – a zona de falha *SWIM* - entre a Falha de Glória e o noroeste de Marrocos onde se encontra o limite transpressivo sismogénico do sistema orogénico *Rif-Tell*. Estes limites litosféricos propostos assentam, ao contrário dos da década de 1970, em estruturas reconhecidas e mapeadas e oferecem novos constrangimentos à geração da sismicidade da região (Rosas *et al.*, 2009; Terrinha *et al.*, 2009). De acordo com outros modelos propostos e considerando os vários indícios de índole sísmológica, tectónica e geodinâmica que existem, a margem sudoeste portuguesa poderá encontrar-se numa situação de transição de margem passiva para margem ativa compressiva, eventualmente associada à formação de uma zona de subducção a sul, que se encontra em fase inicial, e que se propagará para norte (Cabral e Ribeiro, 1989; Ribeiro *et al.*, 1996; Terrinha *et al.*, 2009) (Figura 2.1).

O enquadramento geodinâmico acima referido é responsável pela ocorrência de atividade tectónica regional importante, que se manifesta por deformações neotectónicas, que se desenvolveram no intervalo correspondente ao Pliocénico e Quaternário (desde há 5.3 Ma até hoje), e por uma sismicidade significativa, proporcionando um cenário de relevante potencial sismogénico com sismos de magnitude instrumental elevada, como o evento que ocorreu em 1969 de magnitude estimada $M \sim 7.9$, e catastróficos como o memorável sismo de 1 de novembro de 1755 (Dias e Cabral, 2002).

Como podemos entender, a região geotectónica do globo em que se situa Portugal é bastante complexa e alvo de constante monitorização e importantes estudos, já ao longo de várias décadas, de forma a compreender o seu comportamento e características. A investigação destas regiões é não só importante para conhecer a história geológica do planeta como também o impacto do comportamento deste tipo de fronteira de placas, uma vez que representam zonas com potencial sismogénico.

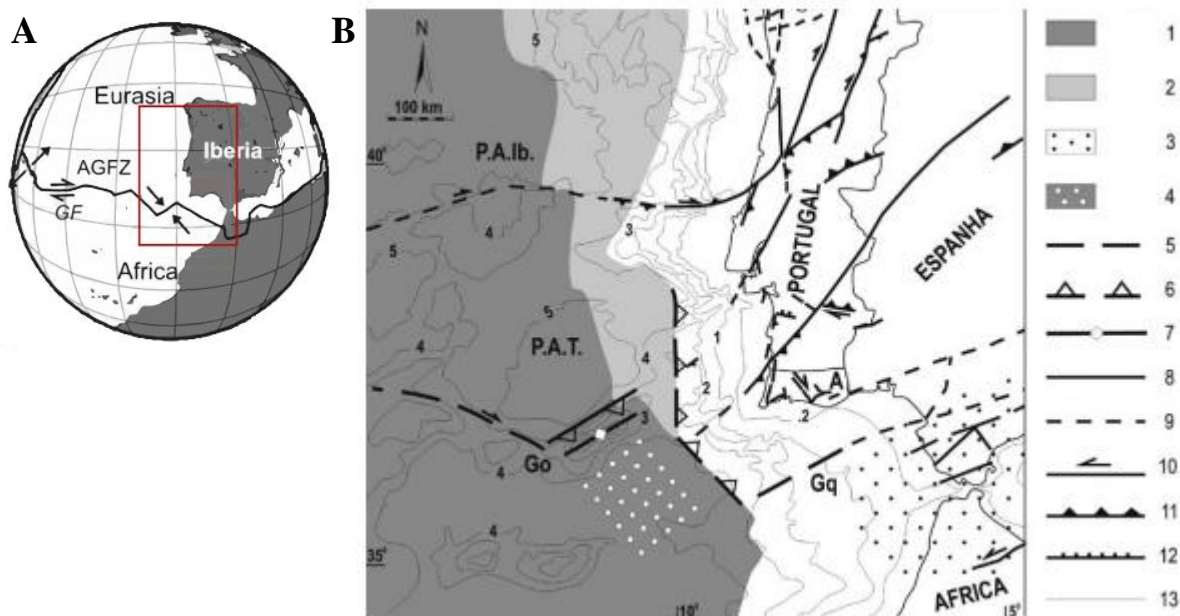


Figura 2.1: (A) Enquadramento geotectónico de Portugal continental. A área demarcada a vermelho corresponde à região apresentada em (B); (B) Enquadramento geodinâmico regional da região do Algarve. 1, crosta oceânica; 2, crosta continental adelgada; 3, colisão continental; 4, fronteira de placas difusa; 5, limite de placa (localização aproximada); 6, zona de subducção incipiente ao longo da margem continental SW Ibérica; 7, dobra antiforma ativa; 8, falha ativa; 9, falha ativa provável; 10, falha de desligamento; 11, falha inversa; 12, falha normal; 13, batimetria em km; Go, Banco de Goringe; Gq, Banco de Guadalquivir; P.A.Ib., Planície Abissal Ibérica; P.A.T., Planície Abissal do Tejo; A, Algarve (adaptado de Terrinha *et al.*, 2006).

2.2. Sismicidade regional

A região do Algarve foi afetada por uma sismicidade histórica importante, compreendendo alguns sismos fortes que causaram danos avultados, dos quais se destacam os eventos distantes, de tipo interplaca, gerados na área do monte submarino de Goringe e na zona de subducção oeste-ibérica, dos quais se destaca o sismo ocorrido em 1755 (Zitellini *et al.*, 1999). Nesta região, a sismicidade com origem no mar é mais significativa do que a sismicidade que tem origem em terra, no entanto regista-se também uma importante atividade sísmica instrumental no interior e perto do litoral.

O Catálogo Sísmico Nacional, que reporta eventos desde o início da Era de Cristo até aos nossos dias, mostra uma sismicidade histórica (sismos anteriores ao início do séc. XX) recheada de eventos de grande magnitude que causaram danos muito importantes no Algarve e uma sismicidade instrumental (após 1900 com a instalação dos primeiros sismógrafos) com um enorme número de eventos, dos quais três ou quatro causaram danos significativos. Para além dos sismos de 1356 e de 1755 com epicentro a oeste do Cabo de São Vicente, a sismicidade histórica refere a ocorrência de importantes eventos com epicentro em terra, dos quais importa salientar pela sua importância os de Portimão (1719, IMM max.¹ = IX), litoral de Tavira (1722, IMM max. = X) e Loulé (1856, IMM max. = VIII) (Carrilho, 2005; Carrilho *et al.*, 2004a).

¹ Intensidade Mercalli Modificada máxima.

A Tabela 2.1 apresenta os sismos que mais afetaram a região do Algarve com as datas de ocorrência, localização epicentral e magnitude. De notar que os erros nos valores indicados é tanto maior quanto mais antigo é o evento. Com o aparecimento da instrumentação sísmológica no princípio do séc. XX e sua evolução nos últimos 100 anos, os erros na localização do epicentro e na avaliação da magnitude têm vindo a decrescer significativamente.

Em 1755, ocorreu um dos maiores sismos da história do país, de magnitude estimada $M \sim 8.4-8.9$ (Baptista *et al.*, 2003). Os seus efeitos foram sentidos em regiões tão remotas como a Finlândia e o tsunami associado de efeitos devastadores provocou danos na costa do Brasil, sul de Inglaterra e *seiches* nos lagos da Escócia. A sua fonte sísmogénica foi alvo de grande discussão na comunidade científica e foram feitas diversas propostas, das quais se salientam os cavalgamentos dos bancos submarinos de Goringe e Guadalquivir, a Falha Marquês de Pombal, a Falha de Ferradura ou a zona de subducção a oeste do Golfo de Cádiz (Zitellini *et al.*, 1999, 2001; Gutscher *et al.*, 2002; Gràcia *et al.*, 2003; Terrinha *et al.*, 2003; Baptista *et al.*, 2003).

Tabela 2.1: Sismos que mais afetaram a região do Algarve (adaptado de Catálogo LNEC, 1996).

Ano	Mês	Dia	Latitude (°N)	Longitude (°O)	Magnitude, M_L (*)
309	2	22	37.00	11.00	7.0
382	1	1	36.88	10.00	7.5
1356	8	24	36.00	10.70	7.5 (7.5)
1504	4	5	38.70	5.00	7.0 (6.9)
1719	3	6	37.10	7.00	7.0 (7.0)
1722	12	27	37.17	7.58	7.8 (6.9)
1755	11	1	36.88	10.00	8.5 (8.7)
1856	1	12	37.10	8.00	6.0 (5.5)
1858	11	11	38.20	9.00	7.2 (7.1)
1896	10	30	37.50	8.20	5.0 (4.7)
1903	8	9	38.40	9.00	5.5 (6.5)
1909	4	23	37.10	8.90	7.0 (6.3)
1964	3	15	36.13	7.75	6.2 (6.2)
1969	2	28	36.20	10.60	7.5 (7.8)

* Valores obtidos por Vilanova (2004).

Como já referido, a sismicidade instrumental também é significativa, sendo mais intensa, em frequência e magnitude, na área costeira situada a sul e a sudoeste do território emerso algarvio, numa faixa que se estende desde o Banco de Goringe, a oeste, até ao estreito de Gibraltar, a este (Figura 2.2). Assim, entende-se que a atividade sísmica não se propaga significativamente para o interior do território algarvio, correspondendo mesmo, a uma fronteira que limita a sul uma área de sismicidade muito fraca, que corresponde ao Baixo Alentejo. Este facto sugere que as estruturas geológicas submarinas presentes absorvem uma parte importante da deformação interplaca, reduzindo a atividade intraplaca (Dias e Cabral, 2002).

A sismicidade instrumental no território emerso é distribuída. Contudo, existem três zonas de maior concentração de sismicidade, designadamente a área que se estende da Serra de Monchique até Portimão, a área entre Albufeira-Loulé-Faro, e a área de Tavira-Vila Real de S. António-Castro Marim.

Na parte imersa a sul do Algarve a sismicidade ocorre associada às principais estruturas tectónicas presentes e à sua dinâmica, como explicado na secção 2.1. (Figuras 2.1 e 2.2).

A coleção dos sismos históricos e instrumentais ocorridos no território continental permite traçar uma carta de intensidades onde se exprimem os valores máximos das intensidades Mercalli Modificada (IMM) observados em todos os locais do país (Figura 2.3). Para o Algarve, a Figura 2.3 mostra uma faixa de intensidade X ao longo de todo o distrito, com maior incidência na região litoral. A carta de intensidades máximas observadas no território continental (Figura 2.3) é um elemento muito importante para a avaliação da perigosidade sísmica. Podemos dizer que, em primeira aproximação, esta carta representa a perigosidade sísmica (passada) do território. Assim, é possível constatar que a perigosidade no Algarve é praticamente constante ao longo de toda a costa, numa faixa litoral onde toma valores máximos e que começa a decrescer à medida que se caminha para norte.

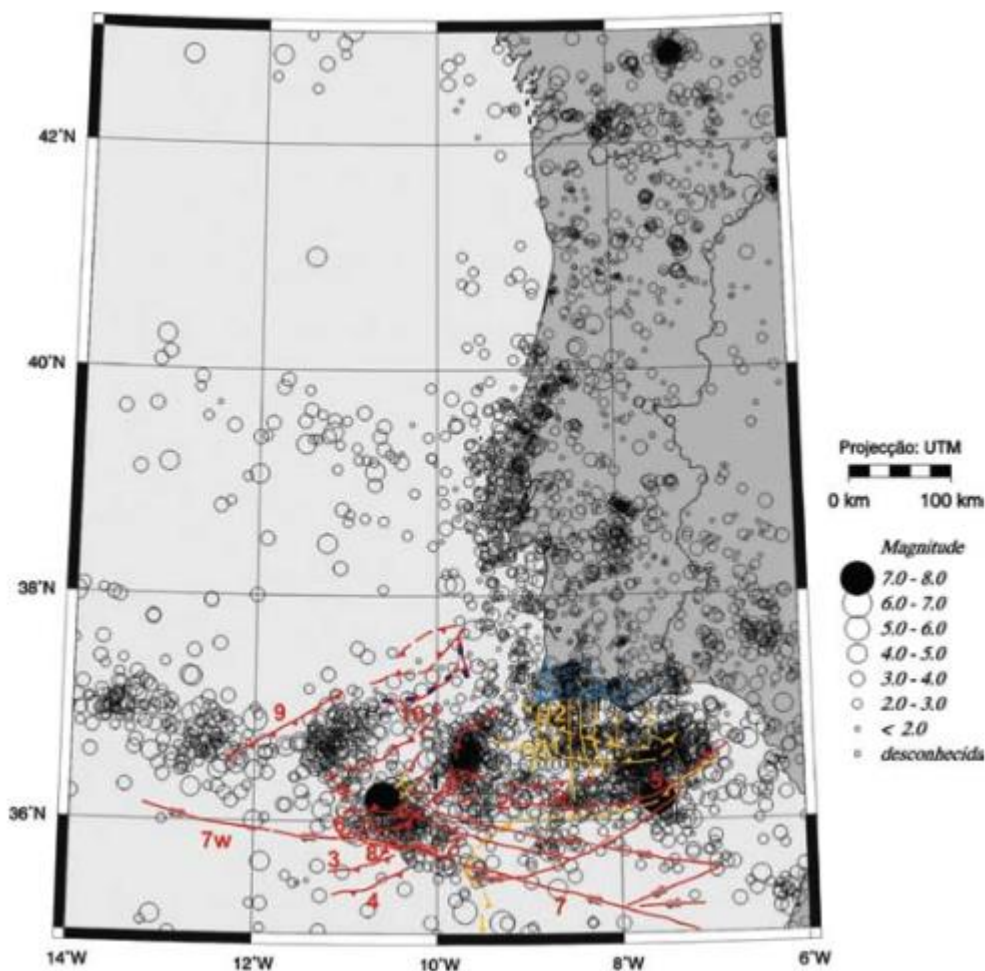


Figura 2.2: Mapa da distribuição de epicentros de sismos instrumentais, na região do Algarve e áreas adjacentes, no período 1961-2003 (Carrilho, 2005) e das principais falhas ativas atualmente identificadas na região do Algarve (zona emersa e imersa). Área imersa: vermelho, falhas ativas no Holocénico; castanho, falhas ativas cegas; azul, componente extensional mesozoica; castanho tracejado, falhas ativas no Pliocénico ou inferidas. Área emersa: cheio, falhas reconhecidas no campo; tracejado, inferidas.

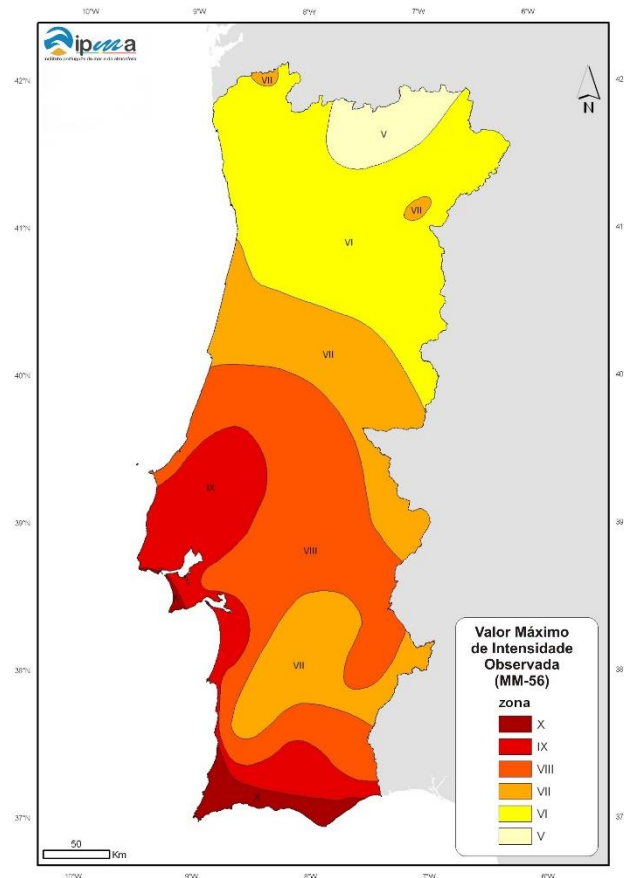


Figura 2.3: Carta de intensidades máximas (IPMA, 2016).

Como se pode constatar, a região do Algarve foi fustigada por eventos sísmicos de elevada magnitude ao longo dos tempos. Estes provocaram diversos danos, tanto estruturais como económicos e sociais e também levaram à perda de vidas humanas. Deste modo, é imperativo que se avalie a perigosidade e o risco sísmico, não só das zonas mais suscetíveis a sofrer estes eventos, mas também das restantes regiões do globo, num esforço conjunto com o objetivo de mitigar o risco e minimizar os danos, tais como aqueles que a história não nos deixa esquecer.

Capítulo 3

Estado de Arte

Em meados do século XX foi dado início a um visível progresso nos estudos de risco sísmico, tanto em Portugal continental como nas ilhas, do qual surgiu uma verdadeira escola nacional de sismologia e engenharia sísmica. Hoje em dia, a comunidade científica dispõe de um acervo de conhecimento nesta área em Portugal que, sem este, seria árduo o desenvolvimento de alguns trabalhos, como é o caso do estudo de Teves Costa e Viegas (2004), Vilanova (2004), Sousa (2006), Vilanova e Fonseca (2007), Rodrigues (2010) e Silva *et al.* (2015), entre outros, e também a elaboração do trabalho apresentado nesta dissertação.

O presente capítulo engloba a apresentação da definição de alguns conceitos de conhecimento essencial para este tipo de estudos, nomeadamente as três variáveis que, através de um processo de convolução, permitem estimar o risco sísmico – perigosidade, exposição e vulnerabilidade ou fragilidade – e também a enumeração de alguns dos estudos realizados ao longo dos últimos anos que têm como temática a perigosidade e o risco sísmico.

3.1. Conceitos teóricos

Um estudo de risco sísmico tem por base o conhecimento e o domínio de alguns conceitos essenciais, que são também comuns a outros tipos de catástrofes naturais, e que permitem compreender o trabalho de melhor forma, o que torna a sua definição essencial.

Assim, nesta secção é apresentada uma sistematização do conjunto de definições necessárias ao enquadramento e compreensão do trabalho que se segue.

3.1.1. Perigosidade sísmica

A perigosidade sísmica, H , ou *hazard* na literatura anglo-saxónica, é entendida como a probabilidade de excedência de um determinado nível da ação sísmica, num local e período de tempo de exposição especificados (Sousa, 2006). O nível da ação sísmica é geralmente traduzido por variáveis que medem o movimento do solo (intensidade macrossísmica, aceleração máxima do solo, etc.), ou pela resposta estrutural dos edifícios (espectro de resposta, por exemplo).

A análise da perigosidade sísmica pode ser feita através de uma abordagem determinista ou probabilista. Na análise determinista da perigosidade sísmica (DSHA) estimam-se os movimentos do solo a partir de um cenário sísmico estipulado. Este cenário consiste na seleção de um sismo de determinada magnitude gerado numa determinada fonte – sismo de referência ou de controlo (Maia,

2011). Este sismo é um evento discreto, onde a recorrência não interfere e corresponde, frequentemente, ao sismo máximo que poderá afetar a região em estudo. A análise probabilista da perigosidade sísmica (PSHA) permite identificar, quantificar e combinar as incertezas associadas ao tamanho, localização, frequência e efeitos de todos os sismos que afetam uma dada região, tanto próximos como distantes (Maia, 2011).

Uma vez que os estudos da perigosidade sísmica apresentados neste trabalho foram realizados através de uma abordagem probabilista, esta será caracterizada com maior detalhe de modo a compreender os parâmetros necessários para a sua realização.

Para se realizar uma análise deste tipo é necessário efetuar os seguintes passos (Kramer, 1996):

1. Identificação das fontes sísmicas;
2. Caracterização da sismicidade em cada uma das fontes, isto é, estabelecer o modelo de ocorrência de sismos;
3. Definição ou seleção das leis de atenuação;
4. Cálculo das probabilidades de excedência de um ou mais parâmetros característicos do movimento do solo no local em estudo, para um determinado período de tempo.

Na realização de estudos probabilísticos são estabelecidas regiões que partilham as mesmas características sismológicas, tectónicas e geológicas, ou seja, zonas onde os sismos apresentam mecanismos de geração comuns. Estas zonas são denominadas zonas de geração sísmica, zonas sismogénicas ou áreas-fonte. Neste contexto, uma zona de geração sísmica representa uma região da crosta aproximadamente homogénea em relação às distribuições que caracterizam a sua atividade sísmica e o seu conhecimento é fundamental para o cálculo da perigosidade sísmica e de períodos de retorno associados a uma dada magnitude. De forma a defini-las é necessário ter em conta toda a informação sísmica e geológica disponível, tais como fatores relacionados com a distribuição epicentral dos sismos e com as estruturas tectónicas ativas (Carvalho e Malfeito, 2016).

A delimitação das zonas sismogénicas é subjetiva, uma vez que pode ser dada maior ou menor relevância a diferentes critérios, como os critérios sísmicos (distribuição epicentral dos sismos e suas magnitudes), tectónicos (existência de estruturas tectónicas ativas), geológicos (tipo de crosta e sua reologia) e/ou estatísticos (quantidade de dados de modo a que a amostra seja estatisticamente significativa) (Carvalho e Malfeito, 2016).

Para cada zona sismogénica é definida a relação entre a frequência com que aí ocorrem os sismos e as respetivas magnitudes, num dado período de tempo. Esta relação pode ser expressa pela lei de Gutenberg-Richter (Gutenberg e Richter, 1944) (3.1), a qual estabelece uma dependência linear entre o logaritmo da frequência de ocorrências de sismos e as suas magnitudes, para uma dada zona k , que se presume homogénea em termos de sismicidade:

$$\log N(m)_k = a_k - b_k m \Leftrightarrow N(m)_k = 10^{a_k - b_k m} = \exp(\alpha - \beta m) \quad (3.1)$$

$$\alpha = a_k \ln 10 \text{ e } \beta = b_k \ln 10$$

Onde $N(m)_k$ é a taxa média anual de eventos com magnitude superior ou igual a m que ocorre na região analisada, a_k é atividade sísmica da zona de geração k , sendo 10^{a_k} a média anual de sismos de magnitude maior ou igual a zero, e b_k , denominado *b-value* ou parâmetro b , é o coeficiente que descreve a taxa relativa de ocorrência entre sismos de maior e menor magnitude na zona de geração k (Carvalho

e Malfeito, 2016). De um modo geral o *b-value* é estável em cada região (varia entre 0.5 e 1.5, tipicamente assume o valor 1) e as variações deste parâmetro verificadas de uma região para outra, estão relacionadas com as suas características mecânicas. Quanto maior for o *b-value* mais frequentes são os sismos de menor magnitude, que é o esperado em regiões pouco resistentes e com grandes heterogeneidades (típico das zonas interplacas), enquanto baixos valores indicam o contrário, isto é, regiões de elevada resistência e grande homogeneidade (típico das zonas intraplaca) (Udias, 1999). Contudo, outros parâmetros podem influenciar o *b-value*, pelo que a sua variabilidade espaço-temporal tem vindo a ser estudada por vários autores, pode ter diferentes causas e ainda não está completamente compreendida.

Considerando que i) as grandezas de eventos sucessivos de uma dada zona de geração são independentes, ii) os sismos com magnitude inferior a um determinado valor m_{0k} , que ocorrem na zona de geração k não são relevantes para o cálculo da perigosidade sísmica (por exemplo, por não causarem danos estruturais relevantes) e iii) em cada zona k existe um valor máximo de magnitude, m_{maxk} , que não pode ser ultrapassado, $N(m)_k$ pode escrever-se como (3.2) (Kramer, 1996):

$$N(m)_k = \exp(\alpha - \beta m_0) \frac{\exp[-\beta(m - m_0)] - \exp[-\beta(m_{max} - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{max} - m_0)]}, \quad (3.2)$$

$$m_0 \leq m \leq m_{max}$$

Sendo truncado tanto inferior, $m_0 \leq m$, como superiormente, $m \leq m_{max}$. Esta nova equação é denominada lei de Gutenberg-Richter truncada (3.2).

É necessário ter em conta que os valores que caracterizam cada uma das zonas sismogénicas estão fortemente condicionados pelos dados sísmicos existentes, ou seja, pelo catálogo sísmico e dados de paleossismicidade que possam existir e que complementam o catálogo. Assim, para a estimativa das taxas de ocorrência das zonas de geração sísmica, a análise do catálogo sísmico constitui uma primeira e fundamental etapa. A estimativa do período de exaustividade (intervalo de tempo para o qual o catálogo se encontra completo) para as diferentes magnitudes é de extrema importância. Esta necessidade tem origem na heterogeneidade do catálogo sísmico, não só por este espelhar a história da rede sísmica (quantidade, localização e qualidade das estações sísmicas), mas também porque os registos históricos estão incompletos, condicionados pela magnitude do evento, importância das localidades afetadas e densidade populacional da época (Carvalho e Malfeito, 2016).

Geralmente, as amplitudes dos movimentos intensos do solo são estimadas usando fórmulas empíricas, denominadas equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo ou leis de atenuação sísmica. Estas leis calculam o movimento do solo em função de variáveis explicativas, como a magnitude, a distância, e, por vezes, o tipo de solos ou o mecanismo da falha e um erro de desvio entre os resultados observados e a função ajustada. Devido à sua importância, a maioria destas equações é atualizada na literatura a cada 3-5 anos sempre que existirem novos dados disponíveis, nomeadamente logo após a ocorrência de grandes sismos em regiões bem instrumentadas (Kramer, 1996). De uma forma geral, a relação utilizada para representar o movimento do solo num determinado local, dada a ocorrência na fonte sismogénica, pode ser descrita pela seguinte expressão (Kramer, 1996):

$$Y = f(M, R, P) \quad (3.3)$$

Em que Y é a intensidade do movimento do solo que se pretende estimar, como a aceleração espectral ($SA, cm/s^2$) ou valores de pico da aceleração ($PGA, cm/s^2$), velocidade ($PGV, cm/s$) ou deslocamento

(PGD, cm), M é a variável que descreve a magnitude do sismo, R é a distância entre a fonte e o local em análise, como a distância hipocentral ou menor distância à falha sísmica (km), e P é um conjunto de variáveis que caracteriza a fonte e/ou o local em análise, como o mecanismo focal da fonte sísmica ou condições geológicas locais.

Para a obtenção de equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo são aplicadas regressões aos dados na relação funcional apresentada em (3.4) (Kramer, 1996).

$$\ln Y = C_1 + C_2 M + C_3 M^{C_4} + C_5 \ln[R + C_6 \exp(C_7 M)] + C_8 R + f_{fonte} + f_{local} \quad (3.4)$$

$$\sigma_{\ln Y} = C_9$$

Onde, para além dos parâmetros já descritos acima, C_i , para $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, representam os coeficientes de ajuste das regressões e f_{fonte} e f_{local} correspondem à variável P da equação (3.3). O termo $\sigma_{\ln Y}$ descreve a incerteza do parâmetro do movimento do solo dado pela relação preditiva. Estatisticamente, representa uma estimativa do desvio padrão de $\ln Y$ com a magnitude e a distância de interesse.

A forma funcional da relação preditiva é geralmente selecionada para refletir os mecanismos do processo do movimento do solo, tanto quanto possível. Isto minimiza o número de coeficientes empíricos e permite ter uma maior confiança na aplicação da relação preditiva para condições (magnitudes e distâncias) que estão pouco representadas na base de dados disponível. A partir da relação preditiva base (3.4) surgiram diversas leis de atenuação deduzidas a partir de dados de sismicidade registados em diferentes locais do globo.

Por fim, toda esta informação (Figura 3.1, passo 1 a 3) é reunida, permitindo, pelo Teorema da Probabilidade Total, calcular a probabilidade de excedência de um determinado parâmetro de movimento do solo (Figura 3.1, passo 4).

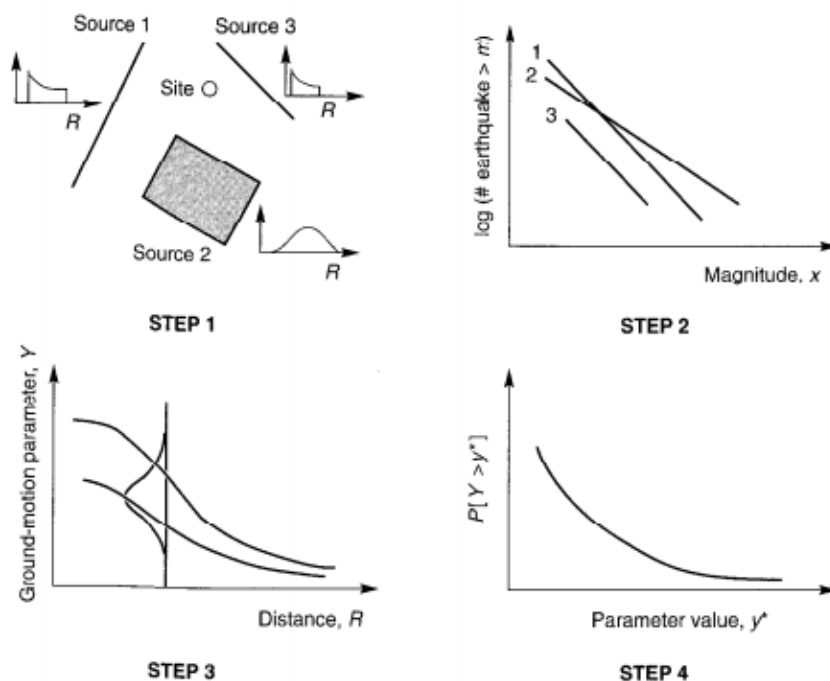


Figura 3.1: Etapas da análise probabilística do risco sísmico (Kramer, 1996).

O cálculo da probabilidade de excedência de um determinado parâmetro de movimento do solo pode ser traduzido pela expressão (3.5), onde Y representa o parâmetro do movimento do solo e X é um vetor de variáveis que influenciam Y , como a magnitude e a distância à fonte (Kramer, 1996).

$$P[Y > y^*] = P[Y > y^*|X] P[X] = \int P[Y > y^*|X] f_x(X) dx \quad (3.5)$$

Os estudos de perigosidade sísmica têm como objetivo final fornecer os valores máximos prováveis de um parâmetro representativo do movimento do solo, em diferentes lugares de uma região, de modo a que sejam úteis no planeamento urbano e no desenho sísmo-resistente das construções.

3.1.2. Vulnerabilidade e Fragilidade sísmicas

A vulnerabilidade e a fragilidade sísmicas traduzem uma característica intrínseca do sistema construído que é a sua suscetibilidade para sofrer danos ou perdas em consequência da ação de um sismo de determinada severidade. É importante distinguir estes dois conceitos, pois nem sempre são de fácil compreensão.

A vulnerabilidade sísmica, V , é uma variável que reflete a capacidade que um determinado elemento exposto tem para resistir, ou o nível de dano que lhe é imposto, pela perigosidade sísmica, sendo condicionada pelo nível dessa perigosidade. Assim, uma curva de vulnerabilidade sísmica de determinada tipologia construtiva é definida pelos valores esperados da variável dano em função da severidade da ação sísmica. Por outro lado, a fragilidade sísmica é uma forma de caracterizar a vulnerabilidade intrínseca de uma tipologia construtiva tendo em conta as incertezas que existem na avaliação da sua resposta, nomeadamente as que decorrem da generalização do modelo estrutural de um edifício para uma tipologia construtiva, bem como as incertezas inerentes aos fenómenos físicos relacionados com a capacidade resistente dos edifícios e com os seus estados limite de dano, dada a intensidade da ação sísmica.

A resposta dinâmica de uma estrutura à vibração do solo é muito complexa, dependendo de vários parâmetros que podem, ou não, estar relacionados entre si e que são difíceis, e alguns impossíveis, de estimar. Estes fatores, tais como (i) a representação exata do movimento do solo, (ii) as características da estrutura como a tipologia construtiva (alvenaria, betão, etc.), (iii) a configuração dos sistemas estruturais (número de pisos, dimensões e forma em planta, disposição em altura, distribuição da massa) e (iv) as disposições de dimensionamento do projeto, a qualidade de construção, os materiais e as técnicas construtivas aplicadas na época em que a estrutura foi construída, podem ser estimados, mas nunca calculados com precisão (Coelho, 2003). Consequentemente, a vulnerabilidade poderá variar dentro de determinados níveis da confiança.

Em suma, a vulnerabilidade de um sistema construído depende do seu dimensionamento sísmo-resistente e do seu processo construtivo. Para além destes fatores, o aumento da vulnerabilidade sísmica no edificado português, deve-se a erros cometidos a diversos níveis, nomeadamente na localização de centros urbanos em zonas de maior incidência sísmica, na definição das ações sísmicas, na escolha do sistema estrutural e na ausência de campanhas para reforço das estruturas mais debilitadas (Oliveira, 2005).

Existe uma grande diversidade de métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica e, conseqüentemente, um grande número de abordagens distintas propostas por diferentes autores no que se refere à classificação destes métodos. Segundo Sousa (2006), sobressaem na literatura da especialidade duas grandes categorias de métodos de avaliação da vulnerabilidade, embora com designações e âmbitos ligeiramente diferentes consoante os autores que os classificam. Os métodos empíricos ou estatísticos baseiam-se nos dados recolhidos da observação dos danos nos edifícios existentes provocados por sismos ocorridos no passado e geralmente representam a ação sísmica pela intensidade macrossísmica. Os métodos mecanicistas ou analíticos são métodos teóricos que envolvem o cálculo mecânico da resposta estrutural do sistema e, sendo mais rigorosos, envolvem uma recolha de informação pormenorizada das estruturas, e representam a ação sísmica por parâmetros físicos, como a aceleração ou deslocamento espectral (S_a e S_d), entre outros (Vicente *et al.*, 2014). As matrizes de probabilidade de danos e as funções de vulnerabilidade são os dois principais tipos de métodos empíricos. Os métodos analíticos permitem determinar as curvas de fragilidade das diferentes tipologias do edificado em estudo.

As curvas de fragilidade, método analítico utilizado neste estudo, são um elemento essencial para a avaliação do risco sísmico uma vez que estas relacionam a probabilidade de uma estrutura atingir ou exceder um determinado estado de dano em função de um parâmetro representativo da ação sísmica, uma medida de intensidade do movimento do solo. Esta medida de intensidade pode ser a aceleração de pico (PGA), a velocidade de pico (PGV), o deslocamento de pico (PGD), a aceleração espectral (S_a), a velocidade espectral (S_v) ou o deslocamento espectral (S_d). A probabilidade de um estado de dano ser excedido é geralmente obtida através da utilização de uma distribuição cumulativa lognormal.

No desenvolvimento das curvas de fragilidade poderão distinguir-se alguns passos principais a considerar como: a tipologia estrutural a considerar (definição de uma taxonomia), a definição dos estados de dano bem como os parâmetros que permitem determinar os estados limite de dano, o parâmetro de medida do movimento do solo e a contabilização de incertezas. Têm sido desenvolvidas diversas taxonomias, tais como a apresentada no projeto HAZUS[®]99, utilizada neste estudo e aqui designada como metodologia FEMA & NIBS, a taxonomia criada com base nas classes de vulnerabilidade EMS-98, a taxonomia desenvolvida no projeto europeu RISK-UE (Mouroux *et al.*, 2004) e ainda a taxonomia recentemente desenvolvida pelo projeto Syner-G (Kaynia, A., 2013). Os estados de dano permitem fazer corresponder um determinado valor do parâmetro de medida de intensidade sísmica aos danos sofridos na estrutura. Diferentes autores/metodologias definem um número e designação diferente de estados de dano.

A metodologia FEMA & NIBS, usada neste trabalho, classifica os danos físicos estruturais e não estruturais das tipologias construtivas em quatro estados de dano descritos qualitativamente: Dano Ligeiro, Moderado, Severo e Total. A estes quatro estados de dano foi adicionado um quinto, designado de Ausência de Dano ou Sem Dano, de modo a completar as distribuições de danos em edifícios (Sousa, 2006). Neste caso, as curvas de fragilidade são assim funções que distribuem um conjunto de edifícios pertencentes a uma dada tipologia por cinco estados de dano, conhecida a severidade da ação sísmica. A Figura 3.2 apresenta um exemplo de curvas de fragilidade para os quatro estados de dano contemplados por esta metodologia. Em estudos de risco sísmico é usual interpretar a probabilidade de dada tipologia se encontrar num determinado estado de dano como a percentagem de edifícios, dessa tipologia, que se encontra nesse estado de dano, quando sujeitos a um determinado nível de ação sísmica (Figura 3.2). Conhecidos os quantitativos dos elementos em risco na região em análise é possível contabilizar o número de edifícios, em cada estado de dano, para a severidade da ação sísmica especificada (Sousa, 2006).

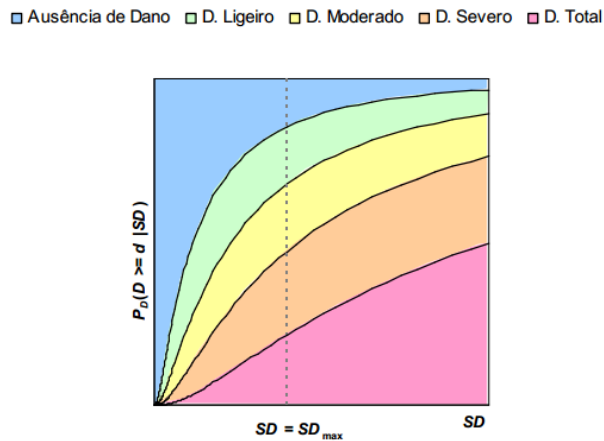


Figura 3.2: Curvas de fragilidade para os estados de dano Ligeiro, Moderado, Severo e Total (adaptado de Sousa, 2006).

3.1.3. Exposição

A exposição representa o valor económico ou humano dos elementos expostos à ação sísmica. Contabiliza os custos diretos dos elementos físicos (estruturais e não estruturais), os custos indiretos originados por interrupção de serviços e comunicações, os custos sociais e os custos de tempo. Para o parque edificado, a determinação desses custos depende de várias características, como por exemplo, a localização dos elementos, acessibilidades, nível e tipo de ocupação e a existência de bens económicos e valor histórico/cultural (Vicente, 2008). As entidades que poderão ser afetadas adversamente em caso de sismo podem ser designadas como elementos em risco ou existências, de que são exemplo os habitantes de uma determinada região e os edifícios, que acabam por se confundir com o próprio sistema construído (Sousa, 2006).

Num estudo de risco sísmico é necessário quantificar a exposição desses elementos, ou seja, o seu valor. Para o efeito, procede-se a um inventário georreferenciado das existências e do seu valor evidenciando fatores capazes de caracterizar a vulnerabilidade dessas existências face à ação sísmica. A definição dos elementos em risco condicionará a forma como é avaliado o risco e terá implicações nas variáveis que o quantificam (Sousa, 2006).

Nos estudos de risco sísmico realizados para Portugal, o inventário dos elementos em risco baseia-se na informação apurada no Recenseamento Geral da População e no Recenseamento Geral da Habitação, realizados pelo Instituto Nacional de Estatística de 10 em 10 anos. O mais recente é o XV Recenseamento Geral da População e o V Recenseamento Geral da Habitação (Censos 2011), realizado pelo Instituto Nacional de Estatística em 2011 (INE, 2012). A partir deste documento é possível realizar o apuramento dos quantitativos habitacionais e populacionais existentes em Portugal continental, conhecer a distribuição geográfica dos elementos expostos ao risco sísmico e a caracterização das tipologias construtivas mais representativas e frequentes de Portugal continental.

3.1.4. Risco Sísmico

O risco sísmico representa uma medida de perdas esperadas, em consequência da ocorrência de um dado evento sísmico que possa acontecer no futuro, num determinado período de tempo de exposição e numa determinada região. Este permite avaliar/estimar as consequências económicas, sociais e ambientais de um determinado evento sísmico.

O risco sísmico resulta da complexa interação entre três componentes: a perigosidade sísmica, H , a vulnerabilidade dos elementos expostos, V , e o grau de exposição, E (Figura 3.3). Esta interação é traduzida pela convolução matemática destas três componentes e o risco sísmico pode assim ser definido através da seguinte expressão:

$$R_S = H \otimes V \otimes E \quad (3.6)$$

Na prática, a análise de risco sísmico envolve a avaliação da probabilidade de se igualar ou exceder um determinado valor de perdas em consequência da ocorrência de um sismo, conhecidas a perigosidade sísmica, ou seja, a probabilidade de excedência de um dado nível de severidade da ação sísmica, num local e período de tempo especificados, a vulnerabilidade sísmica, ou seja, o grau de danos ou perdas resultantes da ocorrência de um determinado nível de ação sísmica e a exposição dos elementos em risco, ou seja, o valor dos elementos expostos ao perigo sísmico (Sousa, 2006).

O cálculo do risco sísmico para uma dada região é fundamental para que sejam tomadas as devidas medidas de mitigação do mesmo. Esta redução do risco sísmico pode ser concebida através do melhoramento da capacidade de resposta dos edifícios, aplicando soluções de reforços sísmico ou através da imposição de códigos de construção mais rigorosos. Estas medidas traduzem uma diminuição da vulnerabilidade sísmica do edificado, componente do risco sísmico na qual é possível intervir. Por vezes, a redução do risco sísmico pode também ser realizada evitando a construção em locais de grande atividade sísmica, possibilitando a diminuição da exposição ao risco.

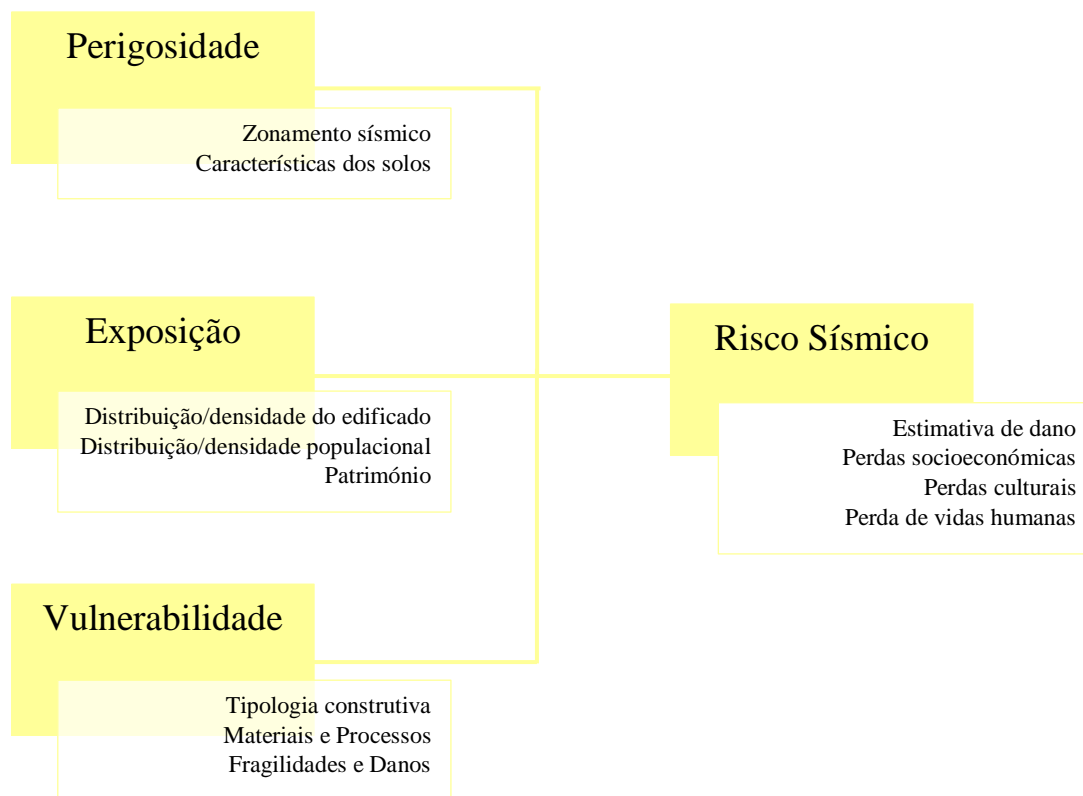


Figura 3.3: Componentes do risco sísmico e respetivos aspetos a considerar na sua avaliação.

Em Portugal, o parque habitacional tem vindo a sofrer alterações significativas ao longo dos anos, tanto no que diz respeito ao tipo de construção, como nas técnicas de construção utilizadas (Carvalho *et al.*, 2001). Esta evolução tem naturalmente um impacto direto na vulnerabilidade do edificado, o que torna necessário compreender de que modo o risco sísmico é afetado.

De acordo com Sousa (2006), os conhecimentos sobre a perigosidade sísmica atual do país, aliada à existência de construção não dimensionada para resistir a sismos, indicam que parte da população vive em situações de risco sísmico considerável, desconhecendo, por vezes, o perigo a que está sujeita.

O reconhecimento da importância do cálculo do risco sísmico no processo de redução de perdas humanas e económicas devido à ação sísmica, tem desencadeado imensos estudos e projetos com diferentes escalas por todo o mundo. Na secção seguinte são mencionados alguns trabalhos recentes desenvolvidos nesta área.

3.2. Estudos prévios

Muitos estudos têm sido realizados por todo o mundo com o principal objetivo de avaliar o risco sísmico e estudar medidas para a sua mitigação.

Uma das primeiras iniciativas para o aprofundamento do conhecimento da ação sísmica em todo o mundo, foi o *Global Seismic Hazard Assessment Program* (GSHAP). Este projeto iniciou-se em 1992 e teve como principal objetivo a criação de modelos de perigosidade sísmica para todas as regiões no mundo. O GSHAP foi concluído em 1999 com a publicação de um mapa global da aceleração de pico do solo para um período de retorno de 475 anos (Giardini, 1999). Mais recentemente, iniciou-se outro projeto denominado *Global Earthquake Model* (GEM), que cobre não só a perigosidade sísmica, como também a vulnerabilidade e exposição a nível global. Esta iniciativa teve início em 2009 e pretende facilitar a colaboração entre diversas instituições e especialistas nas diferentes áreas do risco sísmico, de forma clara e transparente (Pinho, 2010). Um dos produtos deste projeto é a criação de uma plataforma *open-source* para o cálculo da perigosidade e perdas devido a sismos, denominada OpenQuake.

Ao nível europeu é também possível distinguir-se algumas iniciativas no âmbito do estudo do risco sísmico. O projeto SHARE (2009-2012), teve como principal objetivo o desenvolvimento de uma análise probabilística da perigosidade sísmica em toda a Europa, através da criação de um modelo de perigosidade regionalmente homogéneo e da seleção de leis de atenuação apropriadas a cada zona sismogénica (Woessner *et al.*, 2015). Em paralelo, encontrava-se também em desenvolvimento o projeto Syner-G (2009-2012), que se tratava de uma iniciativa que visava a criação de modelos de fragilidade para edifícios, infraestruturas e redes, assim como a definição de uma metodologia unificada para a avaliação da vulnerabilidade física e socioeconómica dos elementos em risco (Kyriazis *et al.*, 2013). O projeto NERA (2010-2014) tinha como objetivo a partilha de informação e colaboração de várias entidades das diferentes áreas do risco sísmico (Giardini *et al.*, 2014).

Outros dois exemplos são os já concluídos projetos RISK-UE (2001-2004) e LESSLOSS (2004-2007). Nestes estudos foram avaliadas a perigosidade e vulnerabilidade sísmica de várias cidades europeias, incluindo Lisboa, e os respetivos resultados foram usados para o cálculo do risco sísmico, o que permitiu a definição de estratégias para mitigação do risco sísmico, tendo em consideração as características específicas de cada cidade (Mouroux e Brun, 2006; Spence, 2007).

A elaboração do Anexo Nacional do Eurocódigo 8 (EC8), realizada em 2006, é exemplo de um estudo a nível nacional que permitiu avaliar a perigosidade sísmica de Portugal, da qual resultou o zonamento sísmico regulamentar para Portugal continental. Para isso foi considerado um modelo de onze zonas sismogénicas de forma a reavaliar a perigosidade sísmica do continente. Assim, foram elaborados mapas de perigosidade sísmica para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (Campos Costa *et al.*, 2008) e definido o zonamento sísmico para uma ação de tipo 1 (sismo afastado) e para uma ação de tipo 2 (sismo próximo) (NP EN 1998-1, 2010).

O projeto ERSTA – *Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve* – promovido pela Autoridade Nacional de Proteção Civil e com a participação de 9 entidades técnico-científicas, iniciou-se em 2007 e foi concluído em dezembro de 2008, e possibilitou o conhecimento aprofundado do risco sísmico e de tsunamis nesta região. Este estudo teve em vista a implementação de medidas de prevenção e sensibilização dos diversos sectores da sociedade para a necessidade de, em conjunto, mitigar o risco sísmico, e o desenvolvimento de um plano especial de emergência detalhado para estes riscos (ANCP, 2009).

Além dos dois projetos à escala nacional supramencionados, os trabalhos de Sousa (2006), Vilanova e Fonseca (2007) e Silva *et al.* (2015) são exemplo de outros estudos existentes no âmbito da perigosidade e risco sísmico. Em Sousa (2006), é feita uma análise do risco sísmico a nível nacional. Neste trabalho foi usada informação dos Censos 2001 que possibilitou o cálculo de perdas para cada uma das freguesias, várias metodologias no cálculo da vulnerabilidade (desde métodos mecanicistas a métodos estatísticos/empíricos), e o software de cálculo de perdas desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, denominado LNECLoss. No segundo estudo, realizou-se um estudo da perigosidade sísmica em Portugal baseando-se numa abordagem segundo uma árvore de decisão, em que cada ramo de decisão utiliza diferentes parâmetros como, por exemplo, três modelos de atenuação da intensidade sísmica, dois zonamentos da sismicidade distintos e dois catálogos de sismos. Desta forma, foi possível obter um mapa da perigosidade média com 10% de probabilidade de excedência num período de 50 anos. Silva *et al.* (2015) apresentam uma visão geral dos desenvolvimentos recentes sobre os diferentes aspetos que influenciam a perigosidade e o risco sísmico em Portugal, bem como uma identificação atualizada das regiões mais vulneráveis e das perdas esperadas para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos. Neste trabalho é usado o *software* OpenQuake.

Se considerarmos uma redução ainda maior na escala de estudo, existem diversos trabalhos para várias regiões do país dos quais se destacaram os de Lisboa (Campos-Costa *et al.*, 2006; Azevedo *et al.*, 2009), da região do vale inferior do Tejo (Vilanova, 2004; Teves Costa e Viegas, 2004), os do Algarve (Ferreira *et al.*, 2010; Rodrigues, 2010; Sousa *et al.*, 2010), de Coimbra (Vicente, 2008), e de Aveiro (Ferreira, 2008; Costa, 2008). Os projetos que englobam uma pequena área de estudo permitem que seja possível uma pesquisa mais exaustiva das propriedades das estruturas em estudo, o que confere uma maior representatividade aos resultados.

São muitos os estudos já realizados no âmbito da perigosidade e risco sísmico, mas nunca os suficientes para compreendermos a dinâmica destas variáveis na sua plenitude. No entanto, a comunidade científica une cada vez mais esforços para caminhar em direção a uma mitigação global do risco sísmico.

Capítulo 4

Compilação dos parâmetros de base

Para uma avaliação do risco sísmico na região do Algarve com base nas três análises de perigosidade sísmica derivadas dos três modelos já mencionados (secção 1.1) é necessário ter em conta as zonas sismogénicas e respetivos parâmetros definidos em cada uma das propostas, quais as leis de atenuação sísmicas utilizadas neste processo, a exposição e a fragilidade do edificado da região algarvia. No presente capítulo são apresentados todos os dados utilizados neste estudo.

4.1. Modelos de zonas sismogénicas

Atualmente existem três propostas de delimitação de zonas sismogénicas e respetivas características, relevantes para Portugal continental. A primeira deu origem ao zonamento sísmico do Anexo Nacional do Eurocódigo 8, aqui intitulada de “Modelo EC8”, a segunda resultou no âmbito do projeto ERSTA, aqui intitulada de “Modelo ERSTA” e a terceira é considerada no projeto europeu SHARE, aqui intitulada de “Modelo SHARE”.

Nas secções seguintes são apresentados os mapas das zonas e respetivos parâmetros, da inteira responsabilidade dos autores dos trabalhos mencionados, não se pretendendo avaliar as opções e as metodologias utilizadas para a estimativa dos parâmetros, mas somente analisar as implicações desses resultados na perigosidade e, posteriormente, no risco sísmico da região do Algarve.

4.1.1. Modelo EC8

Em 2006, aquando da elaboração dos Anexos Nacionais do Eurocódigo 8, regulamento europeu que aborda as questões de segurança das estruturas de betão, metálicas, mistas e de alvenaria para a ação sísmica, foram consideradas e caracterizadas onze zonas sismogénicas para Portugal continental, adaptadas de estudos previamente elaborados em 1996 (Sousa, 1996). O modelo de zonas de geração sísmica permitiu a avaliação da perigosidade sísmica e serviu de base à elaboração do mapa de zonamento sísmico para Portugal continental. Os parâmetros que caracterizam as zonas sismogénicas foram obtidos depois do estudo da exaustividade do catálogo, considerando os sismos com magnitude igual ou superior a 3,5 (Campos Costa *et al.*, 2008). A Figura 4.1 apresenta as zonas sismogénicas consideradas neste modelo e os respetivos parâmetros encontram-se na Tabela 4.1.

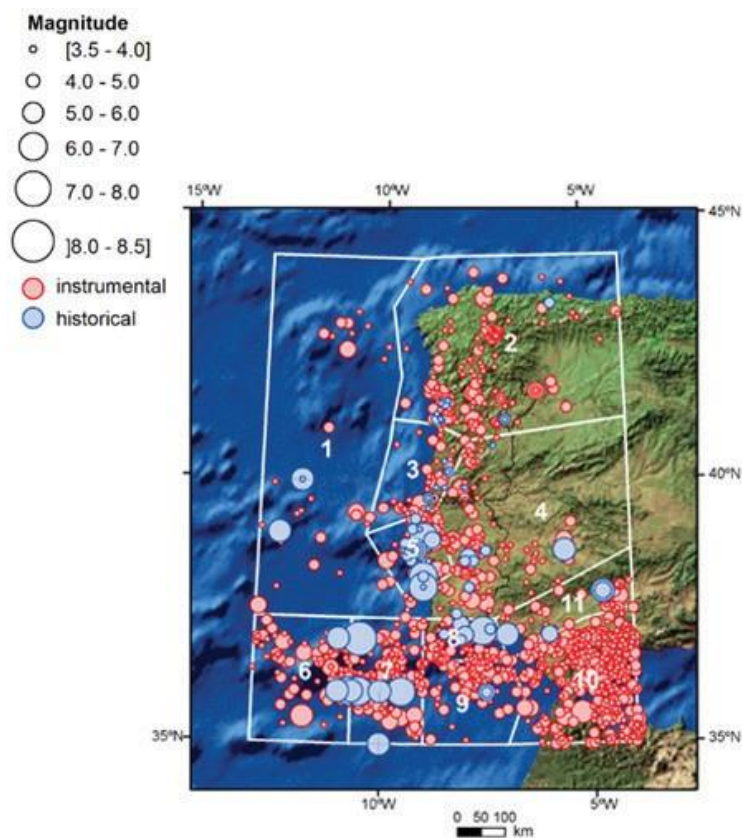


Figura 4.1: Mapa epicentral e delimitação das zonas sísmicas consideradas no Modelo EC8 (adaptado de Sousa, 1996).

Tabela 4.1: Parâmetros definidores das zonas sísmicas consideradas no modelo EC8 (Carvalho e Malfeito, 2016).

Zona	a^*	b	M_{max}
1	2,15	0,68	7,0
2	2,39	0,66	6,0
3	2,64	0,86	5,6
4	2,94	0,82	7,0
5	2,41	0,71	7,2
6	2,54	0,72	7,5
7	2,70	0,72	8,8
8	2,55	0,77	7,8
9	2,98	0,81	7,1
10	3,53	0,79	6,2
11	2,68	0,84	7,0

*Definido para $m = 0$ (secção 3.1.1)

De forma semelhante ao código português em vigor na época, RSA (1983), e devido às características sismotectónicas desta região, são considerados dois cenários no cálculo da PSHA: (i) um cenário de perigosidade denominado ação sísmica de tipo 1, que caracteriza sismos de elevada magnitude a longa distância, com os seus epicentros localizados sobretudo no mar (*offshore*) e avaliados

com a sismicidade das zonas fonte 1, 6, 7, 9 e 10; e (ii) um cenário de perigosidade denominado ação sísmica de tipo 2, que caracteriza sismos de magnitude moderada a curta distância, em que os epicentros localizam-se, na sua maioria, em terra (*inland*) e são avaliados com a sismicidade das zonas fonte 2, 3, 4, 5, 8 e 11 (Campos Costa *et al.*, 2008).

A Figura 4.2 mostra os mapas de perigosidade sísmica correspondentes ao período de retorno de referência de 475 anos. É a partir destes mapas que é possível obter o zonamento sísmico apresentado nos Anexos Nacionais do Eurocódigo 8, ilustrado na Figura 1.1 (NP EN 1998-1, 2010).

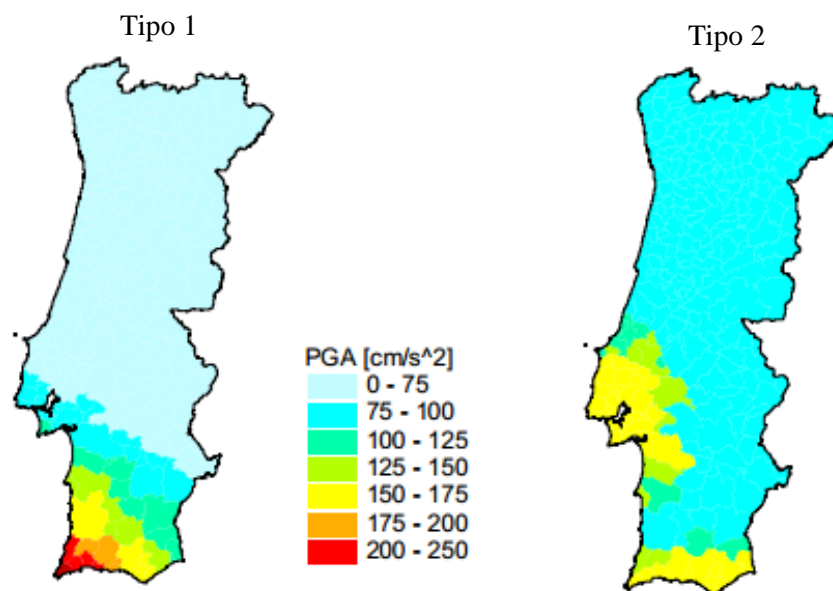


Figura 4.2: Mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos: Tipo 1 – ambiente tectónico oceânico (*offshore*); Tipo 2 – ambiente tectónico continental (*inland*) (adaptado de Campos Costa *et al.*, 2008).

4.1.2. Modelo ERSTA

No âmbito do projeto ERSTA – Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve – financiado pela Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC) e que contou com a participação de várias entidades nacionais, foi realizado um trabalho que, após a revisão da informação sísmica, tectónica e geológica da região algarvia, permitiu redesenhar e propor um novo conjunto de zonas sismogénicas, num total de quinze zonas (Figura 4.3), que potencialmente afetam a região do Algarve (Carrilho *et al.*, 2010). De forma a considerar a perigosidade sísmica para a totalidade do território continental, e no âmbito de outros estudos locais (Jeremias *et al.*, 2012), foram definidas mais quatro zonas sismogénicas, que foram modeladas por áreas de grandes dimensões devido à dificuldade que existe em relacionar os epicentros com as falhas cartografadas na carta neotectónica. Foi realizado um estudo de exaustividade (Rodrigues *et al.*, 2009) do novo catálogo sísmico (Carrilho *et al.*, 2004b) e determinados os parâmetros que caracterizam estas zonas (Jeremias *et al.*, 2012; Rodrigues *et al.*, 2009; Carvalho e Campos Costa, 2015), que se encontram apresentados na Tabela 4.2.

Ao contrário do Modelo EC8, que permitiu apresentar um mapa de perigosidade sísmica para Portugal continental, no projeto ERSTA não foi atingida essa fase, ficando apenas definidas e caracterizadas as zonas sísmogénicas que foram apresentadas como proposta deste modelo.

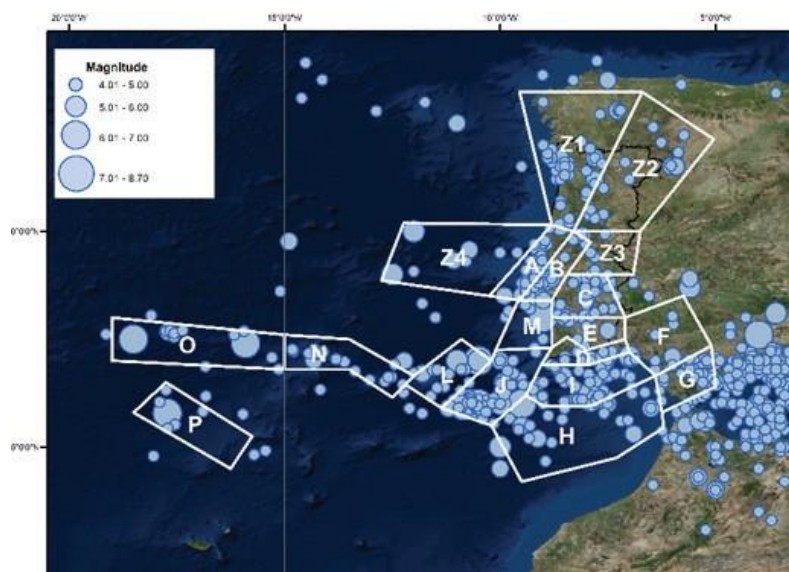


Figura 4.3: Zonas sísmogénicas consideradas no projeto ERSTA (A a P) (Carrilho, F. *et al.*, 2010) e complementadas por outros estudos locais (Z1 a Z4) (Jeremias, F., *et al.*, 2012) (adaptado de Carvalho e Malfeito, 2016).

Tabela 4.2: Parâmetros definidores das zonas sísmogénicas consideradas no modelo ERSTA (Carvalho e Campos Costa, 2015).

Zona	a	b	M_{\max}
A	3,41	0,96	6,0
B	3,03	0,79	7,1
C	3,12	0,89	6,0
D	2,27	0,75	7,0
E	2,68	0,98	5,6
F	2,88	0,97	6,0
G	3,98	1,07	5,4
H	2,14	0,64	7,5
I	2,99	0,76	7,0
J	2,44	0,62	8,7
L	2,75	0,82	7,0
M	1,63	0,62	7,2
N	4,00	1,12	5,1
O	2,04	0,67	8,2
P	0,92	0,51	8,1
Z1	3,56	0,98	5,6
Z2	3,86	1,07	5,7
Z3	3,12	1,09	5,0
Z4	1,68	0,62	7,0

4.1.3. Modelo SHARE

Paralelamente ao projeto ERSTA, e no contexto do projeto europeu SHARE (2009-2013), foram propostas outras zonas sismogénicas para o território português e definidas as taxas de atividade e distribuição de respetivas magnitudes.

O projeto FP7 SHARE teve como objetivo a produção de um mapa de referência da perigosidade sísmica na Europa, de forma a harmonizar a avaliação da perigosidade sísmica além-fronteiras para promover a aplicação dos conhecimentos de última geração da engenharia e facilitar a elaboração de políticas para a mitigação do risco sísmico. Assim, este mapa de referência constitui uma base para uma revisão dos Anexos Nacionais do Eurocódigo 8, dos vários países europeus.

Nesse âmbito, foram propostas várias zonas sismogénicas e, numa perspetiva integradora e de homogeneização do modelo por toda a Europa, determinados os parâmetros a e b da lei de Gutenberg-Richter, assim como as magnitudes máximas, M_{\max} , das zonas. Neste projeto, foram atribuídos até um máximo de quatro valores para a magnitude máxima a considerar, fazendo-se um incremento de 0,2 unidades a um valor base (Woessner *et al.*, 2015). Para as zonas consideradas de baixa sismicidade, em zonas continentais estáveis, o valor base foi de 6,5 e, para as restantes zonas, o valor base foi definido como o maior valor entre o maior valor reportado no catálogo e a magnitude máxima esperada, considerando as falhas existentes e tendo em conta a respetiva incerteza. Os restantes valores foram obtidos com incrementos de 0,2.

Na Figura 4.4 estão apresentadas apenas as zonas definidas para Portugal continental, que constituem as zonas sismogénicas de interesse para este trabalho, e cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 4.3. Nesta tabela também se encontram os valores mínimos e máximos considerados para a magnitude máxima, $M_{\max,\min}$ e $M_{\max,\max}$, respetivamente, bem como um valor médio, $M_{\max,\text{med}}$, que tem em conta as magnitudes máximas intermédias que foram consideradas para cada zona sismogénica.

O mapa de referência da perigosidade sísmica na Europa produzido no âmbito do projeto SHARE encontra-se apresentado na Figura 4.5.

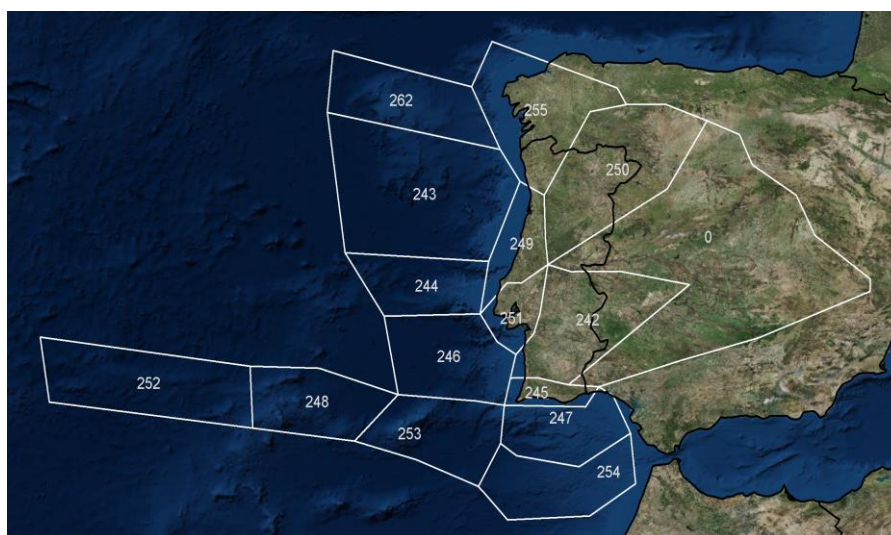


Figura 4.4: Zonas sismogénicas para Portugal continental, propostas no âmbito do projeto SHARE (Carvalho e Malfeito, 2016).

Tabela 4.3: Parâmetros definidores das zonas sismogênicas consideradas no modelo SHARE (Carvalho e Malfeito, 2016).

Zona	a	b	$M_{max,min}$	$M_{max,max}$	$M_{max,med}$
0	2,33	1	6,5	7,4	7,0
242	3,3	1	6,5	7,4	7,0
243	2,1	0,8	7,0	7,6	7,3
244	3,3	0,9	7,0	7,6	7,3
245	3,0	1	6,5	7,4	7,0
246	3,4	1	7,0	7,6	7,3
247	4,3	1	6,8	7,7	7,3
248	4,3	1	8,5	8,8	8,7
249	3,1	1	7,0	7,6	7,3
250	3,6	1	6,5	7,4	7,0
251	3,4	0,9	7,0	7,6	7,3
252	3,3	0,8	8,5	8,8	8,7
253	4,0	0,9	8,5	8,8	8,7
254	3,5	1	6,8	7,7	7,3
255	3,3	1	7,0	7,6	7,3
262	3,5	1	7,0	7,6	7,3

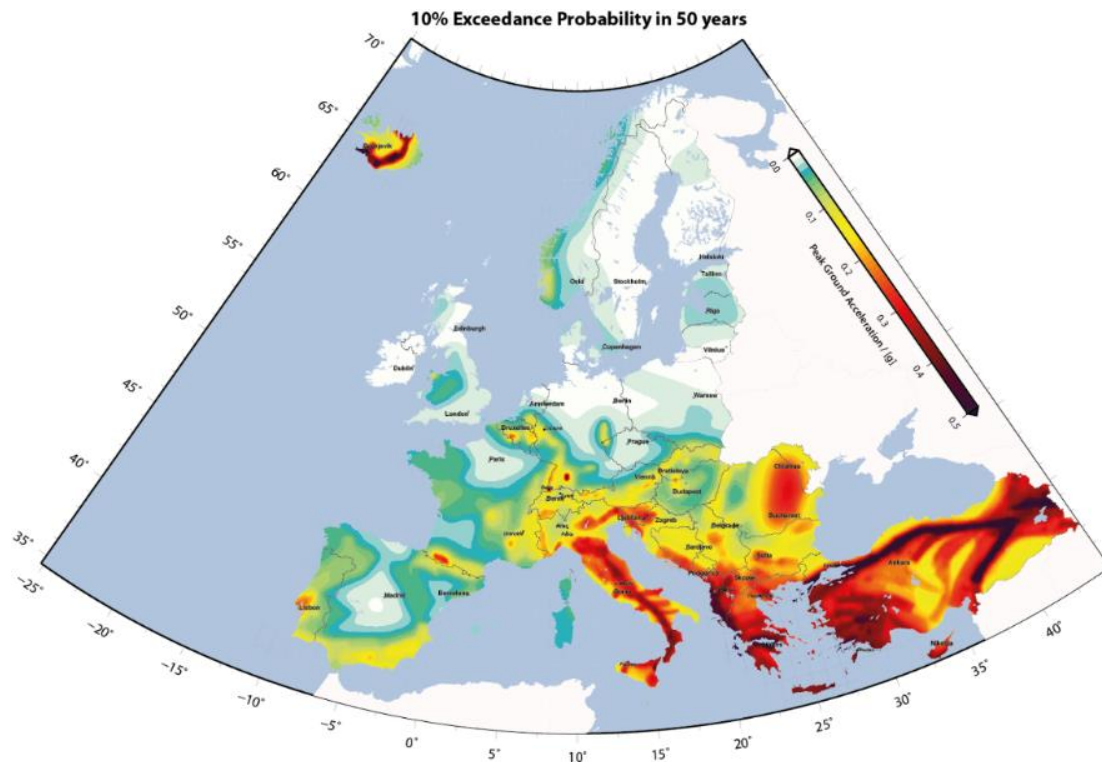


Figura 4.5: Mapa de perigosidade sísmica para a Europa para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, proposto pelo modelo SHARE (Giardini *et al.*, 2013).

4.2. Leis de atenuação

Para além da caracterização do processo da ocorrência sísmica, determinado através da definição das zonas sismogénicas e os seus parâmetros da lei de Gutenberg-Richter, é fundamental caracterizar também o processo de propagação do movimento sísmico entre a fonte e o local em análise. Este processo é traduzido por equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo, aqui designadas de leis de atenuação.

De forma a que a perigosidade sísmica reflita apenas as opções tomadas para o processo de ocorrência sísmica, todos os modelos serão comparados com a mesma lei de atenuação. No entanto, a identificação do modelo ideal para a previsão das amplitudes dos movimentos intensos do solo para uma dada região em particular é das maiores incertezas epistémicas nas análises de perigosidade sísmica. Assim, de maneira a contornar esta dificuldade e também a ter sensibilidade ao uso de várias leis de atenuação consideradas, a perigosidade sísmica foi comparada para os três modelos, para diferentes leis de atenuação e, considerando também, o uso de várias leis combinadas em “árvore lógica”.

A Tabela 4.4 reúne as leis de atenuação em aceleração espectral consideradas neste estudo. A Hipótese 1 considera as leis de atenuação utilizadas no estudo da perigosidade sísmica para a preparação da versão portuguesa da parte 8 do Eurocódigo 8: a lei de Ambraseys (Ambraseys *et al.*, 1996), que foi considerada válida para Portugal continental para sismos gerados no continente (Carvalho, 2007) e a lei semi-empírica em aceleração espectral de Carvalho (2007), obtida de modelos de propagação e ruptura em falha finita e calibrados com registos da rede nacional acelerométrica. A Hipótese 2 utiliza o esquema em árvore utilizado pelo projeto SHARE. Por fim, a Hipótese 3 utiliza a lei de Atkinson & Boore (2006) para sismos gerados em crosta continental, que é uma lei de atenuação global que representa bem o processo de propagação do movimento sísmico no território continental português, e a lei Rodrigues *et al.* (2014), pois é a mais recente lei de atenuação deduzida para Portugal continental para sismos gerados em crosta oceânica.

Tabela 4.4: Leis de atenuação consideradas para o cálculo da perigosidade sísmica.

Ambiente Tectónico	Hipótese 1		Hipótese 2		Hipótese 3	
	Lei	Peso	Lei	Peso	Lei	Peso
Continental	Ambraseys <i>et al.</i> , 1996	100%	Akkar & Bommer, 2010	20%	Atkinson & Boore, 2006	100%
			Cauzzi & Faccioli, 2008	20%		
			Chiou & Youngs, 2008	20%		
			Atkinson & Boore, 2006	20%		
			Campbell, 2003	20%		
Oceânico	Carvalho, 2007	100%	Akkar & Bommer, 2010	35%	Rodrigues <i>et al.</i> , 2014	100%
			Cauzzi & Faccioli, 2008	35%		
			Chiou & Youngs, 2008	20%		
			Zhao <i>et al.</i> , 2006	10%		

4.3. Exposição

O inventário dos elementos em risco efetuado neste estudo baseou-se na informação apurada no V Recenseamento Geral da Habitação, integrado no Censos 2011, realizado pelo Instituto Nacional de Estatística em 2011 (INE, 2012). A parcela do parque edificado da região do Algarve que será considerada neste estudo cinge-se aos edifícios do parque habitacional e adotou-se a unidade primária edifício como o elemento em risco para o qual se pretende obter informação. A informação recolhida encontra-se organizada em número de edifícios (clássicos), segundo a época de construção ou reconstrução do edifício por número de pavimentos e por tipo de estrutura da construção do edifício. Deste modo é possível dispor de um panorama quantitativo global e georreferenciado para o qual se podem inferir as características da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional do Algarve.

Tendo como base a análise do Censos 2001 apresentada em Sousa (2006), a Tabela 4.5 reúne toda a informação apurada no Censos 2011 para a região do Algarve, mostrando os quantitativos de edifícios obtidos dos cruzamentos dos fatores de vulnerabilidade acima mencionados. Foram contempladas 10 modalidades de época de construção, por 7 classes de número de pavimentos e por 5 tipos de estrutura. Em suma, estava teoricamente previsto serem apurados no Censos 2011 os quantitativos de 350 tipologias, aqui denominadas tipologias Censos 2011. No entanto, algumas destas tipologias não possuem existências no parque habitacional do Algarve, sendo assinaladas pelo fundo cinzento das respetivas células, tendo como consequência a redução do número de tipologias representadas no Censos 2011 de 350 para 200.

É necessário ter em atenção que a utilização dos fatores de vulnerabilidade identificados no Censos 2011 para traduzir as técnicas construtivas com maior representatividade no parque habitacional desta região pode apresentar algumas dificuldades pois, naturalmente, os recenseamentos da habitação não estão diretamente vocacionados para serem utilizados em estudos de caracterização da vulnerabilidade sísmica. A isto acresce a possível dificuldade dos recenseadores em classificar o tipo de estrutura dos edifícios, o que pode conduzir a uma eventual classificação errada do tipo de estrutura dos edifícios, do número de pavimentos dos mesmos, ou ainda da sua época de construção (Sousa, 2006).

Na Figura 4.6 exhibe-se a distribuição dos edifícios do parque habitacional do Algarve pelas classes de vulnerabilidade das tipologias Censos 2011.

Tabela 4.5: Quantitativos de edifícios por época de construção, tipo de estrutura e número de pavimentos, de acordo com os Censos 2011.

Época	Nº pavimentos	Betão	ACP	ASP	ATAPS	Outros
Antes de 1919	1	0	0	4 940	4 405	76
	2	0	0	949	606	15
	3	0	0	81	27	0
	4	0	0	10	0	0
	5 a 7	0	0	0	0	0
	8 a 15	0	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
	Total = 11 109	0	0	5 980	5 038	91
1919 a 1945	1	2 001	4 199	3 415	3 751	126
	2	546	1 241	321	514	29
	3	86	89	29	29	8
	4	16	5	2	0	3
	5 a 7	7	1	0	0	1
	8 a 15	1	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
	Total = 16 420	2 657	5 535	3 767	4 294	167
1946 a 1960	1	3 534	5 096	2 587	2 107	47
	2	1 483	1 393	194	270	5
	3	245	137	14	16	1
	4	82	30	5	0	0
	5 a 7	48	4	2	0	1
	8 a 15	11	0	0	0	0
	+ de 15	0	0	0	0	0
	Total = 17 312	5 403	6 660	2 802	2 393	54
1961 a 1970	1	4 892	4 562	1 655	768	54
	2	2 476	1 616	135	95	2
	3	503	161	5	4	0
	4	279	68	0	0	0
	5 a 7	162	22	0	0	0
	8 a 15	46	0	0	0	0
	+ de 15	2	0	0	0	0
	Total = 17 507	8 360	6 429	1 795	867	56
1971 a 1980	1	9 185	5 039	1 858	324	171
	2	6 962	2 942	153	60	7
	3	1 502	338	4	1	0
	4	746	146	1	0	0
	5 a 7	447	28	0	0	0
	8 a 15	145	0	0	0	1
	+ de 15	8	0	0	0	0
	Total = 30 068	18 995	8 493	2 016	385	179
1981 a 1990	1	9 490	4 272	625	263	145
	2	10 804	3 454	63	42	6
	3	2 170	352	6	0	0
	4	1 079	116	2	0	0
	5 a 7	855	51	0	0	0
	8 a 15	345	0	0	0	1
	+ de 15	15	0	0	0	0
	Total = 34 156	24 758	8 245	696	305	152
1991 a 1995	1	4 420	1 907	324	184	53
	2	5 794	1 748	29	28	4
	3	1 258	225	0	1	2
	4	470	45	2	0	0
	5 a 7	498	21	0	0	0
	8 a 15	139	0	0	0	0
	+ de 15	6	0	0	0	0
	Total = 17 158	12 585	3 946	355	213	59
1996 a 2000	1	3 746	1 959	271	173	135
	2	6 677	2 167	21	32	6
	3	1 735	303	0	1	0
	4	602	49	0	0	0
	5 a 7	549	24	0	0	0
	8 a 15	138	0	0	0	0
	+ de 15	8	0	0	0	0
	Total = 18 596	13 455	4 502	292	206	141
2001 a 2005	1	3 149	1 603	269	188	191
	2	8 419	2 162	27	45	13
	3	2 870	339	0	2	1
	4	812	69	1	0	0
	5 a 7	870	61	0	0	0
	8 a 15	234	0	0	0	0
	+ de 15	3	0	0	0	0
	Total = 21 328	16 357	4 234	297	235	205
2006 a 2011	1	2 495	1 056	199	168	214
	2	5 314	1 337	19	31	11
	3	2 346	433	1	1	1
	4	682	126	0	0	0
	5 a 7	680	55	0	0	0
	8 a 15	99	0	0	0	0
	+ de 15	2	0	0	0	0
	Total = 15 270	11 618	3 007	219	200	226
Total = 198 924	Tipo de estrutura	114 188	51 051	18 219	14 136	1 330
1 pavimento	2 pavimentos	3 pavimentos	4 pavimentos	5 a 7 pavimentos	8 a 15 pavimentos	+ de 15 pavimentos
102 291	70 267	15 327	5 448	4 387	1 160	44

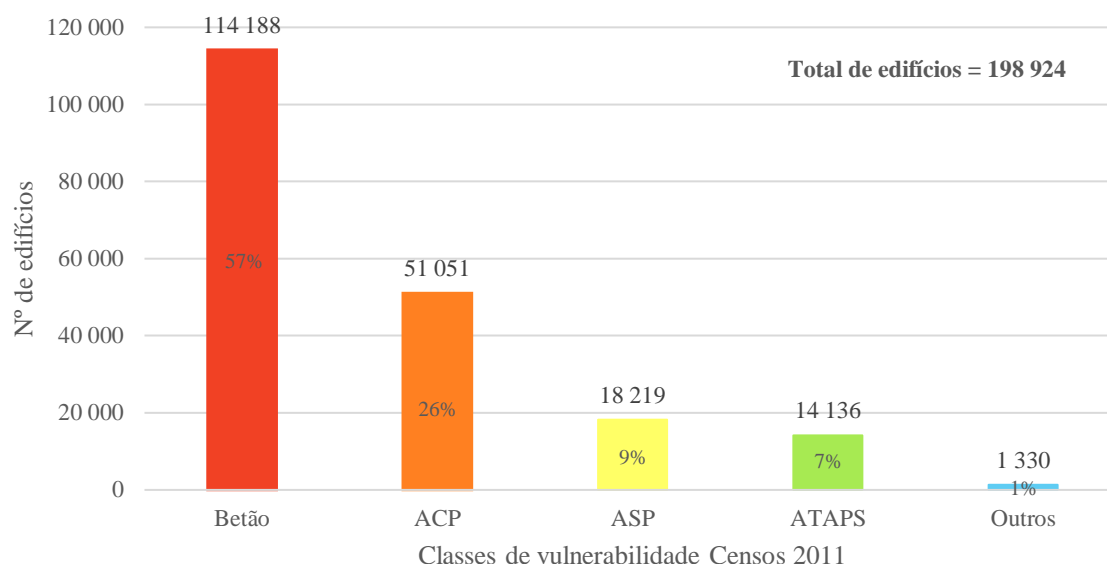


Figura 4.6: Distribuição dos edifícios do parque habitacional do Algarve e pelas classes de vulnerabilidade Censos 2011.

No trabalho de Sousa (2006) é apresentada uma classificação das tipologias do parque habitacional de Portugal continental apurado nos Censos de 2001, com vista a caracterizar a sua vulnerabilidade à ação sísmica, seguindo os critérios da metodologia FEMA & NIBS. Esta classificação é uma adaptação da primeira que foi realizada (Carvalho *et al.*, 2001c; Carvalho *et al.*, 2002a e Carvalho *et al.*, 2002b, in Sousa, 2006) sobre os apuramentos dos Censos 91. A Tabela 4.6 apresenta a classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional apurado nos Censos 2001 de acordo com as tipologias FEMA & NIBS.

Esta metodologia foi utilizada para a classificação das tipologias do parque habitacional do Algarve apurado nos Censos 2011, tendo como ponto de partida a informação contida na Tabela 4.6 (Sousa, 2006). A classificação com base na Tabela 4.6 obrigou à formulação de uma série de hipóteses e à eleição de determinadas opções, que passo a enumerar:

1. As épocas de construção 1981-1985 e 1986-1990 foram agrupadas numa só época de construção, 1981-1990, segundo o Censos de 2011;
2. De modo a introduzir os dados do Censos de 2011 do período de 2002 a 2011, a época de construção 1996-2001 foi convertida na época de 1996 a 2011. Esta conversão foi feita respeitando o número de pavimentos que advinha da época de construção 1996-2001.

Assim, nesta classificação foram estabelecidas sete grandes classes de vulnerabilidade com base em dois fatores de vulnerabilidade: época de construção e tipo de estrutura. Desta forma, o parque foi classificado em quatro classes de vulnerabilidade de estruturas de Alvenaria, “Adobe Taipa e Alvenaria de Pedra Solta (ATAPS)”, “Alvenaria ≤ 1960 ”, “Alvenaria 1961-85” e “Alvenaria 1986-11” e em três classes de vulnerabilidade de estruturas de Betão Armado (BA), repartidas por grandes épocas de construção idênticas às da alvenaria, “BA ≤ 1960 ”, “BA 1961-85” e “BA 1986-11”. A altura dos edifícios é fator influenciador da resposta sísmica destes pelo que, de forma a considerá-lo, cada uma das sete classes foi ainda subdividida noutras sete, recorrendo ao terceiro fator de vulnerabilidade, o número de pavimentos, dando assim origem a 49 tipologias diferentes, designadas como tipologias FEMA & NIBS. A cada uma destas tipologias corresponde uma classe de vulnerabilidade sísmica (Tabela 4.6).

Na Figura 4.7 exibe-se a distribuição dos edifícios do parque habitacional do Algarve pelas principais classes de vulnerabilidade das tipologias FEMA & NIBS. Onze das 49 tipologias construtivas consideradas não têm representatividade no parque habitacional do Algarve apurado nos Censos 2011, pelo que as 49 tipologias originais se reduzem a 38.

Tabela 4.6: Classificação da vulnerabilidade sísmica do parque habitacional apurado nos Censos 2001 de acordo com as tipologias FEMA & NIBS (Sousa, 2006).

Época	Nº de pav.	Tip.	Betão	Tip.	ACP	Tip.	ASP	Tip.	ATAPS	Tip.	Outros	
Antes de 1919	1					1		1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros	
	2					2		2		2		
	3					3	ATAPS + Outros	3		3		
	4			11	Alvenaria ≤ 1960	4		4		4		
	5 a 7 8 a 15 + de 15			12		5		5				
1919 a 1945	1	29	BA ≤ 1960	8	Alvenaria ≤ 1960	8	Alvenaria ≤ 1960	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros	
	2	30		9		9		2		2		
	3	31		10		10		3		3		
	4	32		11		11				4		
	5 a 7 8 a 15 + de 15	33 34		12		12				5 48		
1946 a 1961	1	29	BA ≤ 1960	8	Alvenaria ≤ 1960	8	Alvenaria ≤ 1960	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros	
	2	30		9		9		2		2		
	3	31		10		10		3		3		
	4	32		11		11				4		
	5 a 7 8 a 15 + de 15	33 34		12		12				5 48		
1961 a 1970	1	36	BA 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros	
	2	37		16		16		2		2		
	3	38		17		17		3		3		
	4	39		18		18				46		
	5 a 7 8 a 15 + de 15	40 41 42		40		40				47 49		
1971 a 1980	1	36	BA 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros	
	2	37		16		16		2		2		
	3	38		17		17		3		3		
	4	39		18		18				46		
	5 a 7 8 a 15 + de 15	40 41 42		40		40				47 48 49		
1981 a 1985	1	36	BA 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	15	Alvenaria 1961-85	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros	
	2	37		16		16		2		2		
	3	38		17		17		3		3		
	4	39		18		18				46		
	5 a 7 8 a 15 + de 15	40 41 42		40		40				47 48		
1986 a 1990	1	43	BA 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros	
	2	44		23		23		2		2		
	3	45		24		24		3		3		
	4	46		25		25				46		
	5 a 7 8 a 15 + de 15	47 48 49		47		47				47 48		
1991 a 1995	1	43	BA 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros	
	2	44		23		23		2		2		
	3	45		24		24		3		3		
	4	46		25		25				46		
	5 a 7 8 a 15 + de 15	47 48 49		47		47				47		
1996 a 2001	1	43	BA 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	22	Alvenaria 1986-01	1	ATAPS + Outros	1	ATAPS + Outros	
	2	44		23		23		2		2		
	3	45		24		24		3		3		
	4	46		25		25				46		
	5 a 7 8 a 15 + de 15	47 48 49		47		47				47 48		
Classes de vulnerabilidade					ATAPS + Outros	Alv. ≤ 1960	Alv. 1961-85	Alv. 1986-01		BA ≤ 1960	BA 1961-85	BA 1986-01

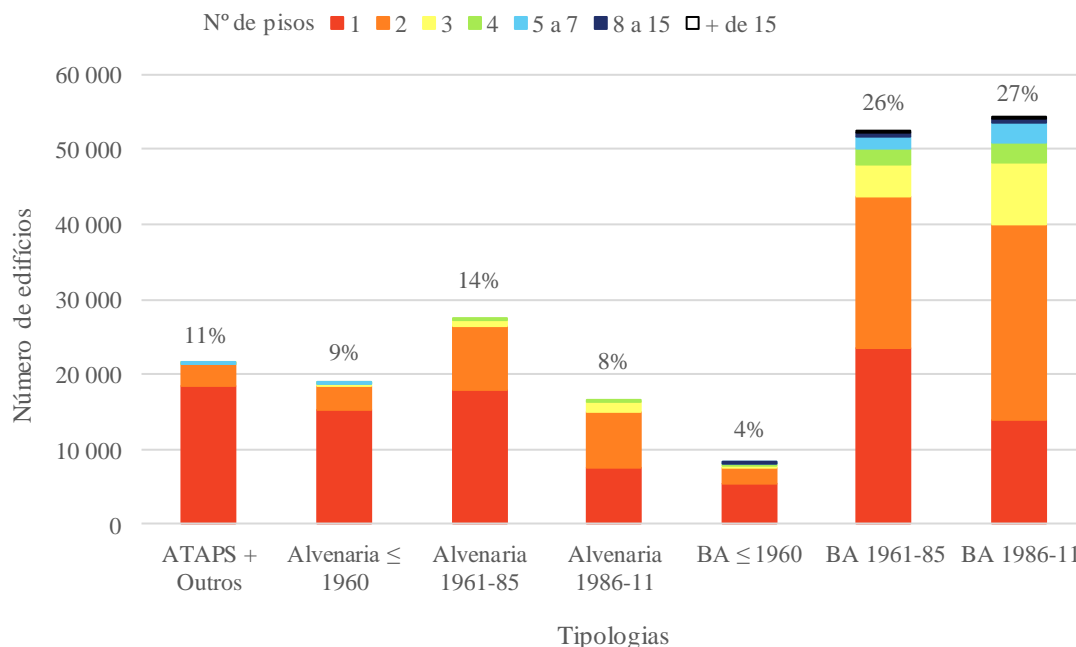


Figura 4.7: Distribuição das classes de vulnerabilidade sísmica pelo parque habitacional do Algarve, com base nos Censos 2011 e segundo as Tipologias FEMA & NIBS (ATAPS = Adobe, Taipa e Alvenaria de Pedra Solta, BA = Betão Armado).

4.4. Vulnerabilidade sísmica do parque habitacional

Com base no Censos 2011 (INE, 2012) existem 198 924 edifícios clássicos na região do Algarve, constituindo 5,9% do parque habitacional do País. É nas freguesias do litoral Sul Algarvio, principalmente naquelas onde se situam os grandes centros urbanos da região, que se verifica uma maior incidência destes elementos em risco (Figura 4.8).

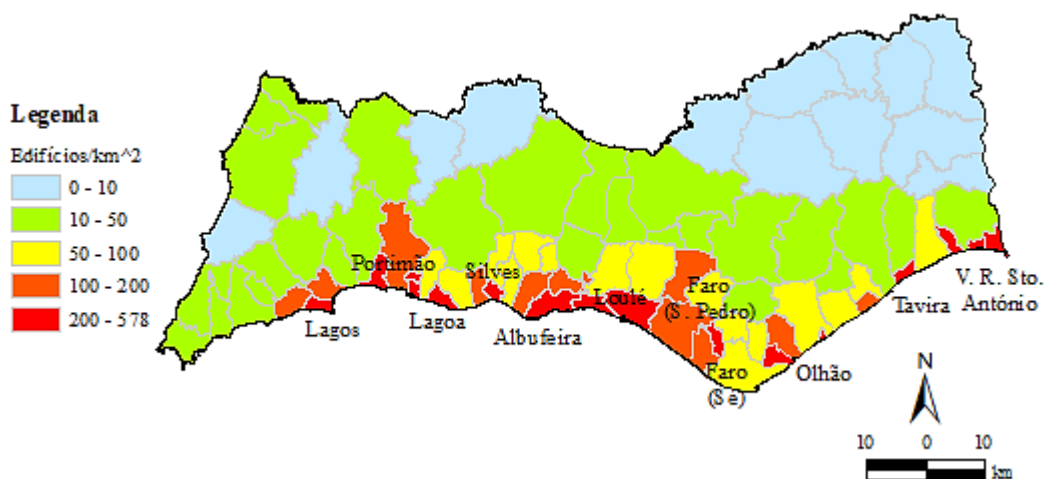


Figura 4.8: Densidade de edifícios na região do Algarve, segundo os Censos 2011.

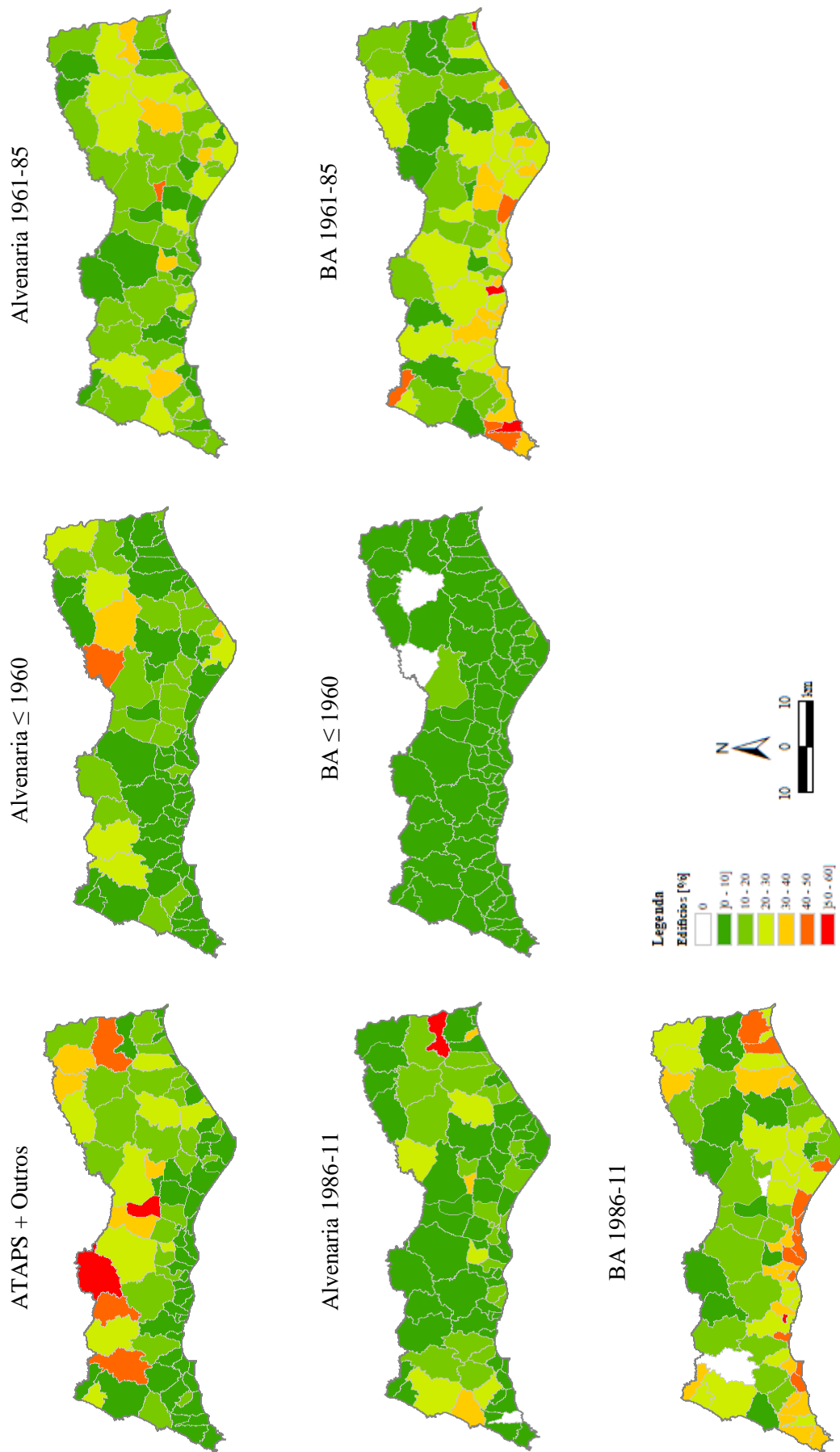


Figura 4.9: Distribuição das tipologias construtivas presentes no parque habitacional do Algarve, de acordo com a classificação FEMA & NIBS.

Na Figura 4.9 ilustra-se a distribuição das tipologias construtivas presentes no parque habitacional do Algarve, apresentando, por freguesia, a percentagem de edifícios em cada uma das sete grandes classes de vulnerabilidade FEMA & NIBS.

Da análise desta figura conclui-se que a classe de vulnerabilidade “ATAPS + Outros” exibe uma grande incidência na zona norte do distrito algarvio, onde existem freguesias em que a percentagem de edifícios desta classe chega aos 60%. A classe de “Alvenaria ≤ 1960 ” também apresenta uma maior incidência na região norte do distrito, se bem que inferior à da classe de vulnerabilidade anterior. No que toca à classe de “Alvenaria 1961-85” verifica-se que tem uma representação heterogénea no parque habitacional algarvio. Sobre a classe de “Alvenaria 1986-11” observa-se que não ocorre a concentração destes edifícios em nenhuma região particular do distrito, variando a percentagem de incidência entre 0 e 40%, com destaque para a freguesia de Azinhal, que apresenta uma percentagem de 50 a 60% de edifícios. A percentagem reduzida em todas as freguesias do Algarve dos edifícios da classe de “BA ≤ 1960 ”, geralmente inferior a 10%, confirma o já apurado na Figura 4.7, em que se constatou que esta classe representa apenas 4% das existências do parque habitacional algarvio. Quanto às classes de “BA 1961-85” e de “BA 1986-11” observa-se que apresentam uma distribuição geográfica semelhante com maior incidência (40 a 50%) nas freguesias junto ao litoral algarvio.

4.5. Curvas de fragilidade sísmica

As curvas de capacidade e de fragilidade das tipologias FEMA & NIBS utilizadas neste estudo basearam-se nas curvas previamente desenvolvidas por Carvalho *et al.* (2001, 2002a e 2002b) e posteriormente atualizadas no âmbito do projeto LESSLOSS (Campos Costa *et al.*, 2005). No âmbito do trabalho de Sousa (2006), estas curvas foram generalizadas para todo o território de Portugal continental, considerando, entre outros aspetos, as diferenças no dimensionamento das estruturas nas várias zonas sísmicas regulamentares.

Tal como já mencionado, a metodologia FEMA & NIBS classifica os danos físicos estruturais e não estruturais das tipologias construtivas em quatro estados de dano descritos qualitativamente: Dano Ligeiro, Moderado, Severo e Total. A estes quatro estados de dano foi adicionado um quinto, designado de Ausência de Dano ou Sem Dano, de modo a completar as distribuições de danos em edifícios (Sousa, 2006). A aplicação desta metodologia neste trabalho terá apenas em consideração os danos nas componentes estruturais dos edifícios, não sendo avaliados os danos nas componentes não estruturais dos mesmos, tais como os recheios, os adereços arquitetónicos, as componentes mecânicas, elétricas, etc. As curvas de fragilidade sísmica para as tipologias FEMA & NIBS são introduzidas no Simulador de Cenários Sísmicos em conjunto com as restantes componentes, de forma a calcular o risco sísmico da região do Algarve.

Na Figura 4.10 exemplifica-se o traçado dessas curvas para uma das tipologias mais vulneráveis do parque habitacional de Portugal continental.

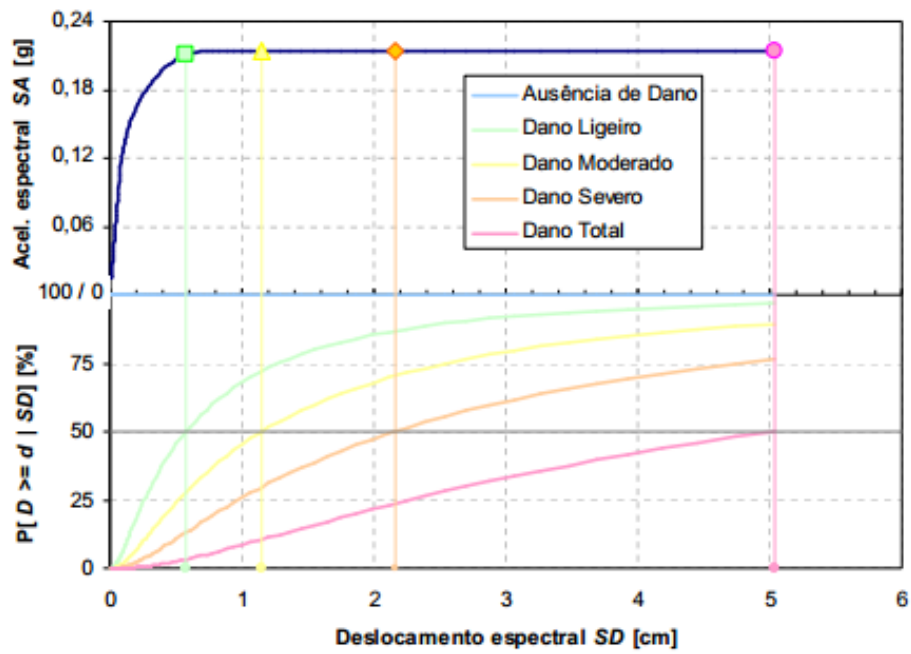


Figura 4.10: Exemplo de curvas de capacidade, fragilidade e limiares de estados de dano da tipologia “ATAPS + Outros” com 1 pavimento (Campos Costa *et al.*, 2005).

Capítulo 5

Metodologia

O cálculo da perigosidade sísmica para a região do Algarve com base nos diferentes parâmetros e condições de três modelos – EC8, ERSTA e SHARE – apresentados na secção 4.1, foi executado utilizando o *software* OpenQuake, recentemente desenvolvido, e que é uma plataforma *open-source* para o cálculo e avaliação da perigosidade e risco sísmico.

O risco sísmico foi calculado com o auxílio do Simulador de Cenários Sísmicos (SCS), também conhecido como LNECLoss, que foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) no âmbito de um projeto promovido pelo Serviço Nacional de Proteção Civil (SNPC).

Este capítulo fornece uma breve descrição e caracterização destas duas ferramentas.

5.1. OpenQuake

O *Global Earthquake Model* (GEM)² é uma parceria público-privada que dirige um esforço colaborativo global em que a ciência é aplicada de modo a desenvolver recursos de alta qualidade para uma avaliação transparente do risco sísmico e para facilitar a sua aplicação na mitigação do risco sísmico em todo o mundo. O OpenQuake é o resultado desta iniciativa, sendo uma plataforma *open-source* para o cálculo e avaliação da perigosidade e risco sísmico (Figura 5.1). Este *software* permite calcular a distribuição das perdas, tanto económicas como humanas, para um cenário específico da ação sísmica, ou das perdas acumuladas devidas a todos os eventos sísmicos que podem ocorrer numa determinada região num dado período de tempo (Silva *et al.*, 2013).

Atualmente, o mecanismo por trás da plataforma tem três modelos cálculo para obter a perigosidade sísmica e seis modelos para calcular o risco sísmico, que se distinguem pela sua metodologia, ficheiros de *input* e diferentes *outputs* obtidos. A perigosidade sísmica pode ser obtida por uma análise probabilista (PSHA), uma análise determinista (DSHA) com base num evento sísmico específico ou utilizando metodologias estocásticas com um modelo de falha finita ou rotura de falha. Em relação ao risco sísmico, dois dos modelos calculam as perdas e as distribuições de danos devido a um único evento, outros dois calculam o risco sísmico através de uma descrição probabilística dos eventos, e movimentos de solo associados, que podem ocorrer numa determinada região dentro de um determinado período de tempo, outro permite estimar a distribuição de perdas com base num conjunto de eventos estocásticos e, por último, um modelo que permite realizar uma modelação probabilística das perdas para avaliar se determinadas medidas de adaptação serão economicamente viáveis ou não.

² www.globalquakemodel.org

A escolha de um *software* para o cálculo da perigosidade sísmica recaiu sobre esta plataforma devido à sua natureza *open-source* e no forte envolvimento da comunidade científica no desenvolvimento dos vários módulos de análise. O projeto SHARE fez uso desta plataforma e, a nível nacional, o projeto PRISE (Marques *et al.*, 2014) foi a primeira iniciativa independente da Fundação GEM a utilizar o *software* OpenQuake nas suas tarefas.

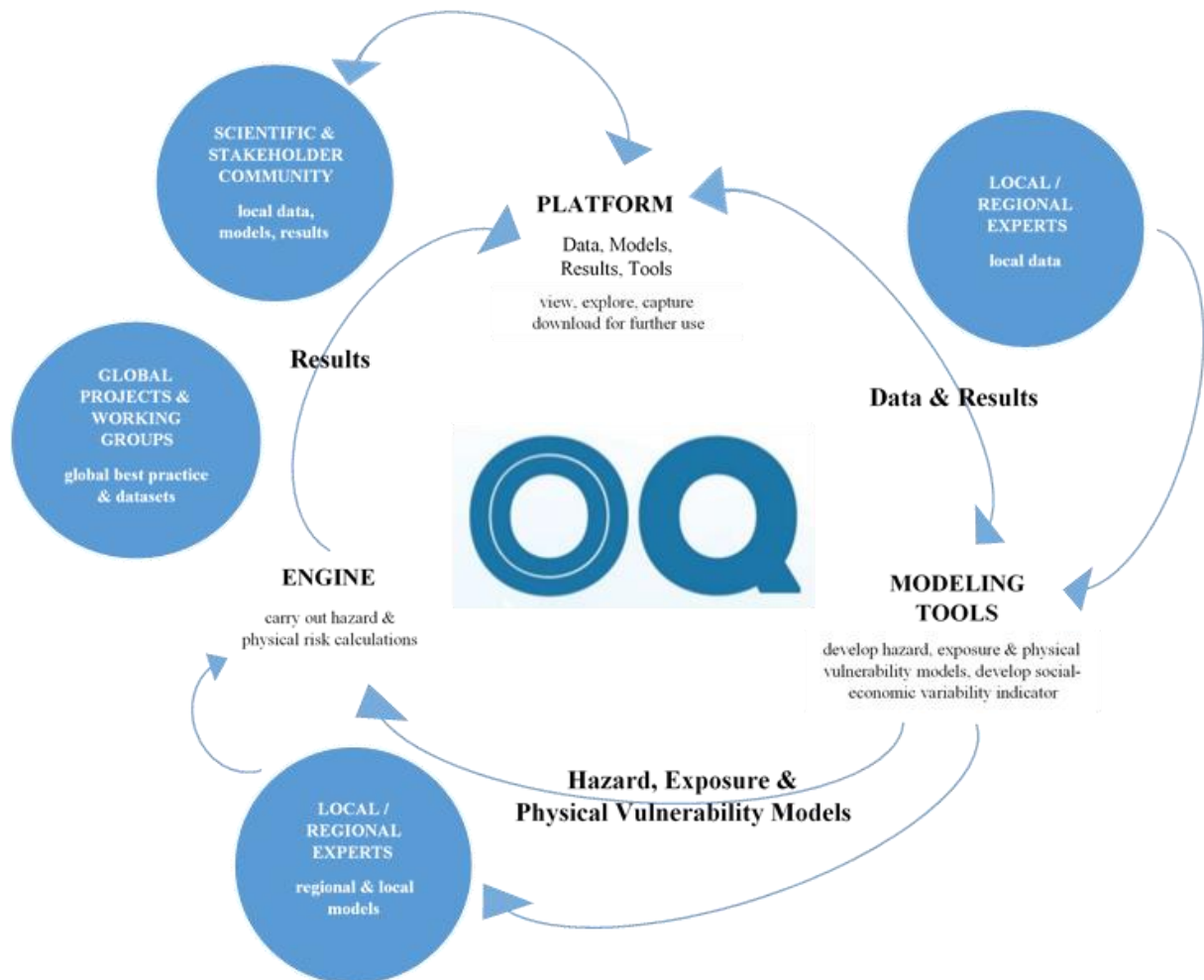


Figura 5.1: Diagrama do funcionamento da plataforma OpenQuake (adaptado de Pagani *et al.*, 2014).

5.1.1. Modelo de cálculo

O modelo de cálculo utilizado neste estudo é designado *Classical Probabilistic Seismic Hazard Analysis* e baseia-se numa análise probabilista da perigosidade sísmica (PSHA). Este modelo permite o cálculo de curvas e mapas de perigosidade sísmica para um dado local com base no modelo clássico de Cornell (1968), seguindo a metodologia apresentada por Field *et al.* (2003). Este modelo é constituído por um conjunto de etapas de cálculo de modo a atingir o seu objetivo final:

1. Processador em “árvore lógica”:
 - i) Cria um modelo de fonte sísmica (*Seismic Source Input Model*), ou seja, um ficheiro que contém a geometria e as taxas de atividade de cada fonte sísmica sem qualquer incerteza epistémica. Este ficheiro pode conter uma ponderação de várias possibilidades de descrição da fonte sísmica (por exemplo, fonte-área, fonte-falha sísmica, sismicidade de fundo);
 - ii) Cria um modelo do movimento do solo (*Ground Motion Model*), ou seja, um ficheiro com a lei de atenuação considerada para cada região tectónica (*Ground Motion Prediction Equation*, GMPE). Também é possível realizar uma ponderação de várias leis de atenuação para cada região tectónica.
2. Modelo clássico PSHA: cálculo da probabilidade de excedência de um determinado nível de movimento do solo, para um determinado período de tempo, e obtenção das curvas de perigosidade sísmica.

5.1.2 Ficheiros de *input*

Para a avaliação da perigosidade sísmica no território continental considerou-se as zonas de geração sísmica propostas por cada modelo (EC8, ERSTA e SHARE), apresentadas nas Figuras 4.1, 4.3 e 4.4 e os respetivos parâmetros apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. Estas informações constituem o modelo de fonte sísmica inicial, referido na secção 5.1.1. Neste estudo só foi considerado o modelo fonte-área para descrever a fonte sísmica. As equações de previsão do movimento do solo consideradas neste estudo, aqui designadas leis de atenuação, encontram-se apresentadas na Tabela 4.4.

5.1.3 Principais *outputs*

Os *outputs* obtidos a partir deste modelo de cálculo são curvas de perigosidade características de cada um dos locais de interesse e mapas de perigosidade sísmica para uma dada região.

Neste estudo teve-se em conta apenas os mapas de perigosidade sísmica que foram calculados para probabilidades de excedência de 10% em 50 anos e de 2% em 50 anos. Estes mapas permitem ter uma visão espacial da perigosidade sísmica ao longo de uma dada região. Estes resultados servirão de *input* ao LNECLoss para o cálculo do risco sísmico.

5.2. LNECLoss

O programa de simulação de cenários sísmicos LNECLoss, desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), constitui uma ferramenta computacional privilegiada que permite avaliar perdas em consequência de um cenário sísmico especificado (Campos Costa *et al.*, 2004). A existência de uma ameaça sísmica no continente Português, conjugada com a necessidade de avaliar o risco sísmico, foram alguns dos motivos que levaram ao desenvolvimento deste simulador. O fluxograma apresentado na Figura 5.2 sintetiza os procedimentos implementados no simulador bem como os dados necessários ao seu funcionamento e os resultados que produz.

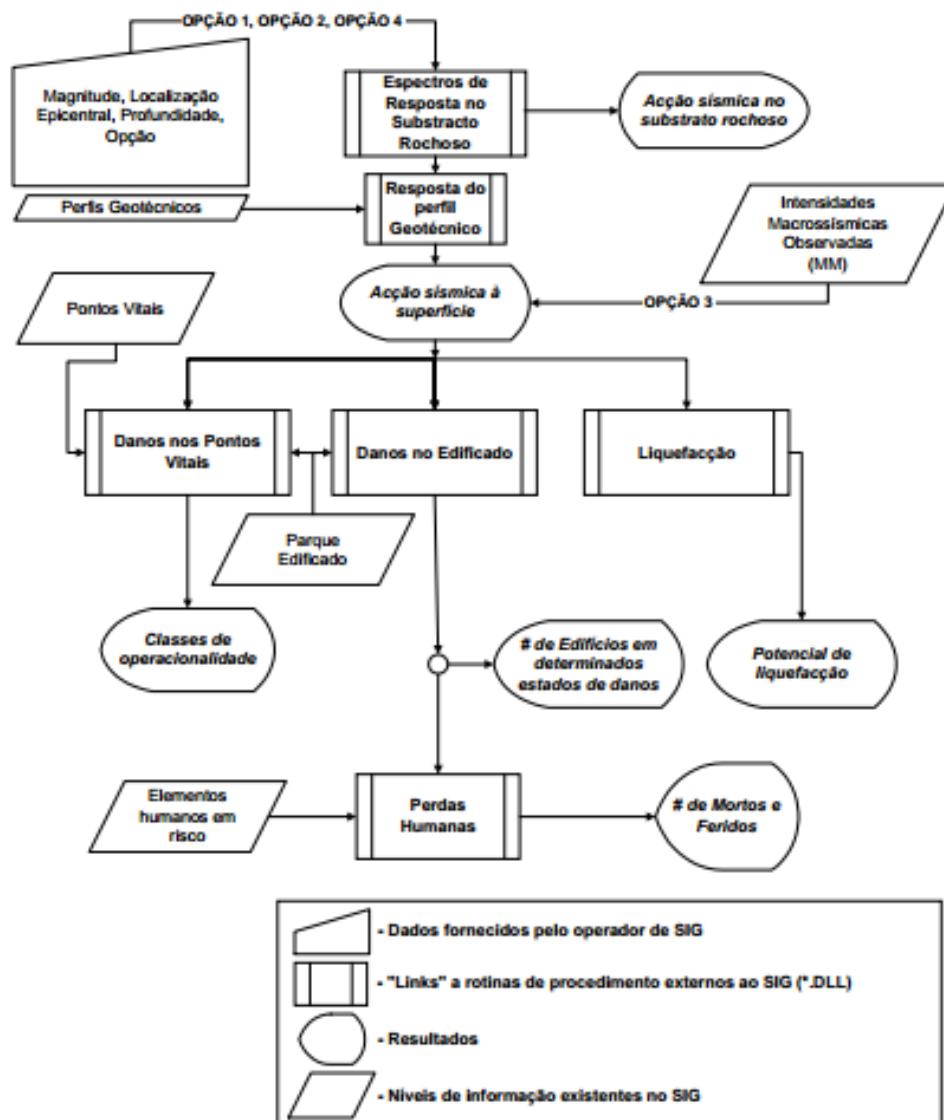


Figura 5.2: Fluxograma do Simulador de Cenários Sísmicos. As opções 1, 2, 3 e 4 representam as definições iniciais do evento sísmico (Campos Costa *et al.*, 2004).

Este é constituído por um conjunto de rotinas, desenvolvidas na linguagem de programação FORTRAN 90, e constitui uma ferramenta privilegiada para modelar e estimar a ação sísmica no substrato rochoso e à superfície (caracterizada ou não por um plano de falha), os danos estruturais no edificado, as perdas humanas e as perdas económicas em consequência de um cenário sísmico de ocorrência pré-definido ou especificado pelo utilizador, em qualquer região de Portugal continental e do Arquipélago dos Açores (Campos Costa *et al.*, 2004; Sousa *et al.*, 2004; Sousa *et al.*, 2006). O simulador foi integrado como aplicação externa num Sistema de Informação Geográfica (SIG) (Sousa, 2006).

O simulador de cenários sísmicos encontra-se estruturado de uma forma modular, o que lhe permite uma grande versatilidade em termos de atualização de dados e modelos de simulação. Os elementos que constituem os dados de entrada para o Simulador, encontram-se armazenados em bases de dados que incluem a informação apurada nos Censos 2011 sobre o edificado residencial e os seus ocupantes. A informação está organizada em função das variáveis relevantes para a caracterização da vulnerabilidade dos elementos em risco e referenciada geograficamente. A unidade elementar de análise do programa de simulação é a freguesia de qualquer região de Portugal continental e do Arquipélago dos Açores (Afonso e Carvalho, 2015).

Neste trabalho apenas se avaliará os danos estruturais no edificado do parque habitacional do Algarve, pelo que se terá em conta o módulo de avaliação de danos no edificado do LNECLoss. Este módulo tem os seguintes dados de entrada ao Simulador:

1. Um registo, por freguesia, que contém a informação relativa à variável número de edifícios apurada nos Censos 2011, cruzando os fatores de vulnerabilidade número de pavimentos, época de construção e elementos resistentes utilizados na construção. Estas informações correspondem ao que se encontra apresentado na secção 4.3;
2. Opção de modelação dos danos. Este módulo possui quatro opções de modelação disponíveis: (i) *Di Pasquale & Orsini (1997)*, (ii) *Zuccaro & Papa (2002)*, (iii) *Giovinazzi & Lagomarsino (2003 e 2004)* e (iv) *FEMA & NIBS (1999)*. A opção escolhida para este trabalho é a opção de modelação (iv), que é baseada num modelo mecanicista (secção 3.1.2). É importante ter em conta que os estados ou grau de dano variam consoante o modelo de dano adotado, nomeadamente se é um modelo de dano estatístico ou mecanicista;
3. Valores de aceleração espectral que resultam da perigosidade sísmica, calculada com recurso ao OpenQuake (secção 5.1). Estes valores encontram-se organizados por DTCCFR³ e correspondem a uma probabilidade de excedência de 10% e 2% em 50 anos.

Os dados de entrada ao Simulador referidos em 1. e 2. são considerados dados internos e os dados referidos em 3. são considerados externos, ou seja, são fornecidos pelo utilizador através de diversas interfaces desenvolvidas para o efeito.

Como resultados tem-se uma estimativa do número e percentagem de edifícios, nos diferentes estados de dano, por unidade geográfica e tipologia.

³ Distrito, Concelho, Freguesia.

Capítulo 6

Resultados e Discussão

Avaliar o impacto das diferentes opções tomadas pelas equipas de trabalho responsáveis pelos projetos mencionados (secção 4.1) na estimativa da perigosidade sísmica e, posteriormente, na avaliação do risco sísmico para a região do Algarve é o objetivo final do trabalho apresentado nesta dissertação.

Neste capítulo são descritas as opções tomadas e apresentados os resultados obtidos, bem como uma análise crítica aos mesmos.

6.1. Validação

Em primeiro lugar, de forma a mostrar que o programa selecionado para o cálculo da perigosidade sísmica – *OpenQuake* (secção 5.1) – reproduz os mesmos resultados que são apresentados nos mapas oficiais, aquando da aplicação dos mesmos *inputs*, realizou-se uma validação do mesmo.

A validação do programa *OpenQuake* só é possível realizar tendo em conta os mapas de perigosidade sísmica obtidos aquando da preparação dos Anexos Nacionais do Eurocódigo 8 e que, após revisão e correções deram origem ao zonamento sísmico apresentado no EC8 (Figura 1.1). O modelo EC8 não apresenta um mapa total, em que seria considerada a influência das zonas sismogénicas oceánicas e continentais em conjunto, mas dois mapas que mostram a influência destes dois ambientes tectónicos em separado. O modelo SHARE apresenta um mapa de perigosidade sísmica para toda a Europa, não sendo indicado para a validação do programa, e o projeto ERSTA não alcançou esta etapa de trabalho.

Considerando as zonas sismogénicas e respetivos parâmetros propostas no âmbito da preparação dos Anexos Nacionais do Eurocódigo 8 (secção 4.1.1) e as mesmas leis de atenuação usadas nesse projeto para a obtenção dos mapas de perigosidade sísmica oficiais (Figura 4.2), que correspondem à Hipótese 1 apresentada na Tabela 4.4, foi possível obter os mapas de perigosidade sísmica para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, apresentados na Figura 6.1.

Comparando a Figura 6.1 com os mapas oficiais, apresentados na Figura 4.2, é possível observar que são muito semelhantes, pois apresentam o mesmo padrão de variação da perigosidade ao longo do território e valores da mesma ordem de grandeza. Deste modo, pode-se concluir que o programa escolhido é indicado para o cálculo da perigosidade sísmica.

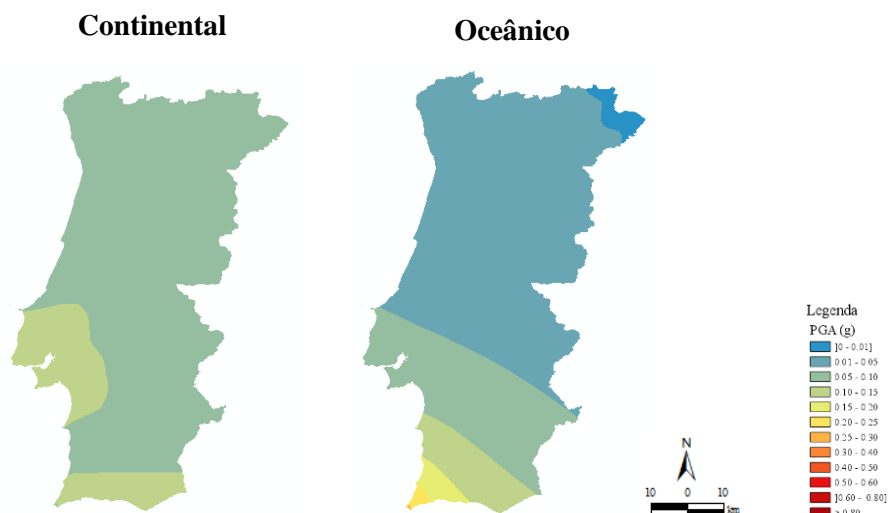


Figura 6.1: Mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, com base nas zonas sísmogénicas e respetivos parâmetros obtidas no âmbito do modelo EC8.

6.2. Resultados

Para compreender o impacto das decisões tomadas *à priori* pelas equipas de trabalho de cada projeto nas avaliações do risco sísmico é necessário observar primeiro a influência que estas têm na perigosidade sísmica da região do Algarve. A perigosidade é uma das componentes que constituem a convolução que dá origem ao risco sísmico, em conjunto com a exposição e a vulnerabilidade ou fragilidade do edificado (secção 3.1.4). Por esta razão é de extrema importância primeiro entender de que forma as diferentes decisões se refletem na perigosidade sísmica.

Com base nas zonas sísmogénicas e respetivos parâmetros do modelo EC8 (secção 4.1.1) e com as Hipóteses 1, 2 e 3 das leis de atenuação apresentadas na Tabela 4.4 foi calculada a perigosidade sísmica para a região do Algarve. Foi seguido o mesmo procedimento para o modelo ERSTA (secção 4.1.2) e para o modelo SHARE (secção 4.1.3).

Nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 são apresentados os mapas de perigosidade sísmica correspondentes ao procedimento acima descrito, para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, que corresponde a um período de retorno de 475 anos. São apresentados mapas de perigosidade para o ambiente tectónico continental, ou seja, considerando apenas as zonas sísmogénicas definidas em terra, mapas de perigosidade para o ambiente tectónico oceânico, em que se tem em conta somente as zonas sísmogénicas definidas em mar e, por fim, mapas de perigosidade sísmica totais, considerando a influência das zonas sísmogénicas definidas em terra e em mar.

Para avaliar os impactos no risco sísmico da região foram considerados os resultados obtidos no cálculo da perigosidade sísmica e também a exposição e fragilidade das tipologias construtivas do parque habitacional do Algarve.

Nas Figuras 6.5 a 6.11 encontram-se apresentados os mapas de risco sísmico. Estes mapas indicam a percentagem de edifícios num determinado estado de dano para cada uma das freguesias do Algarve, 84 freguesias no total. Os estados de dano adotados neste trabalho são: Sem Dano, Dano Ligeiro, Moderado, Severo e Total ou Colapso.

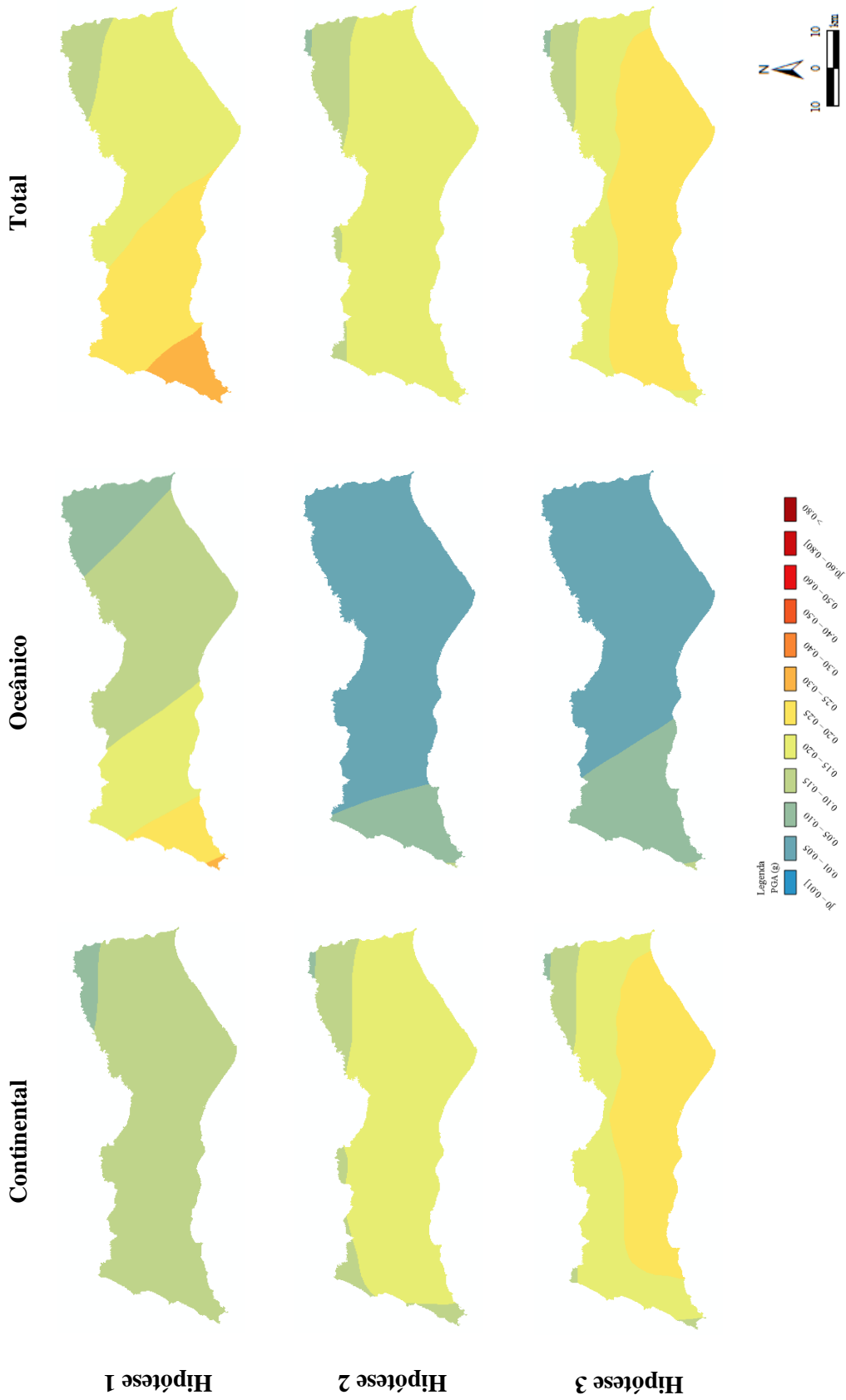


Figura 6.2: Mapas de perigosidade sísmica para o Algarve para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, com o Modelo EC8 com a Hipótese 1 (Ambraseys *et al.* (1996) para ambiente tectónico continental e Carvalho (2007) para ambiente tectónico oceânico), Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico) e Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

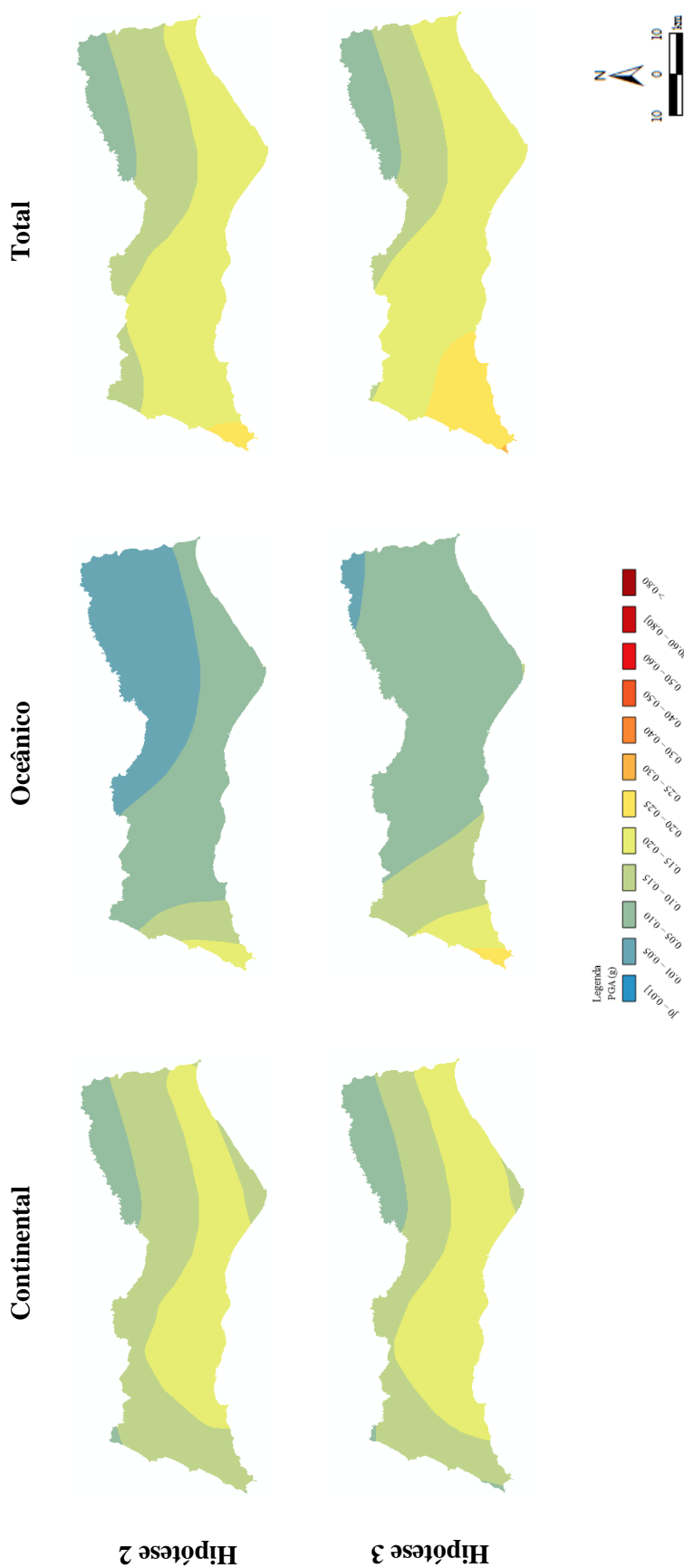


Figura 6.3: Mapas de perigosidade sísmica para o Algarve para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, com o Modelo ERSTA com a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico) e Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

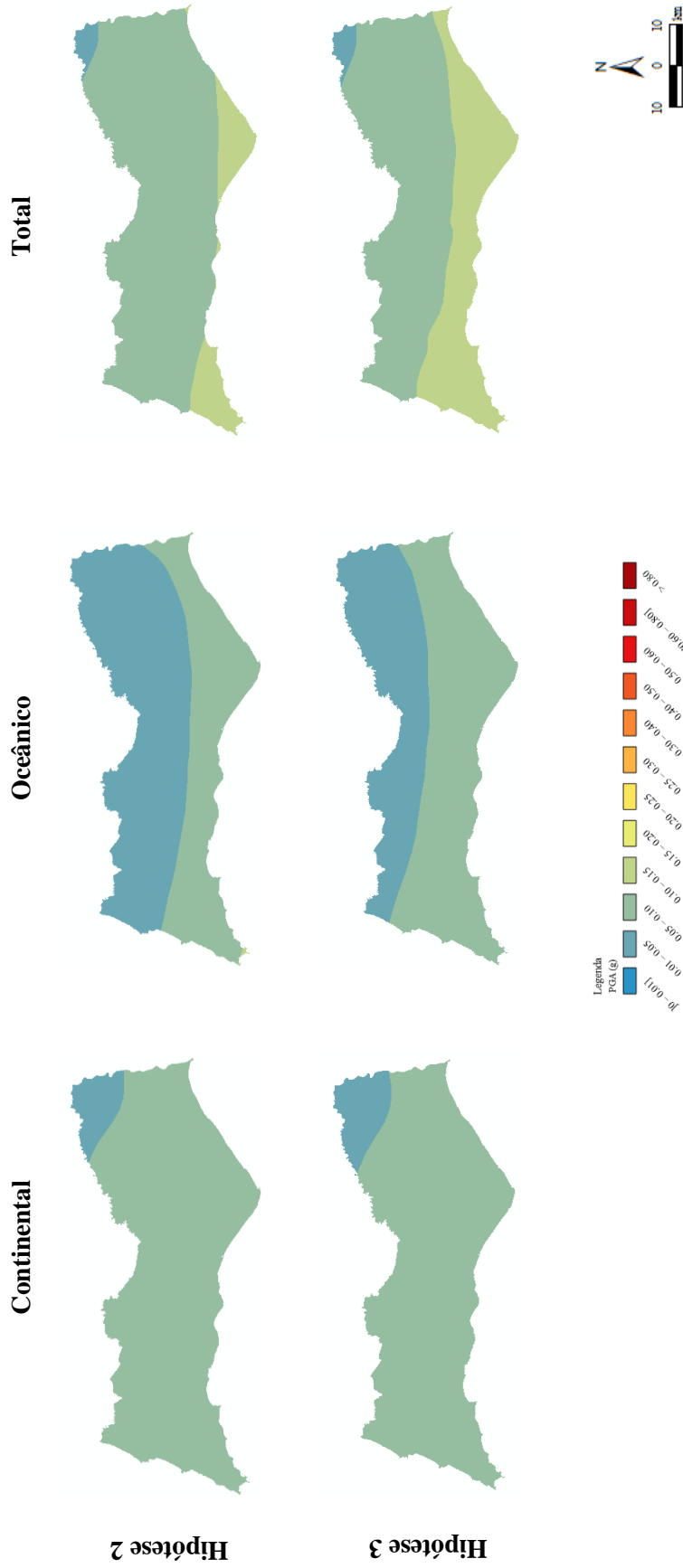


Figura 6.4: Mapas de perigosidade sísmica para o Algarve para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, com o Modelo SHARE com a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico) e Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

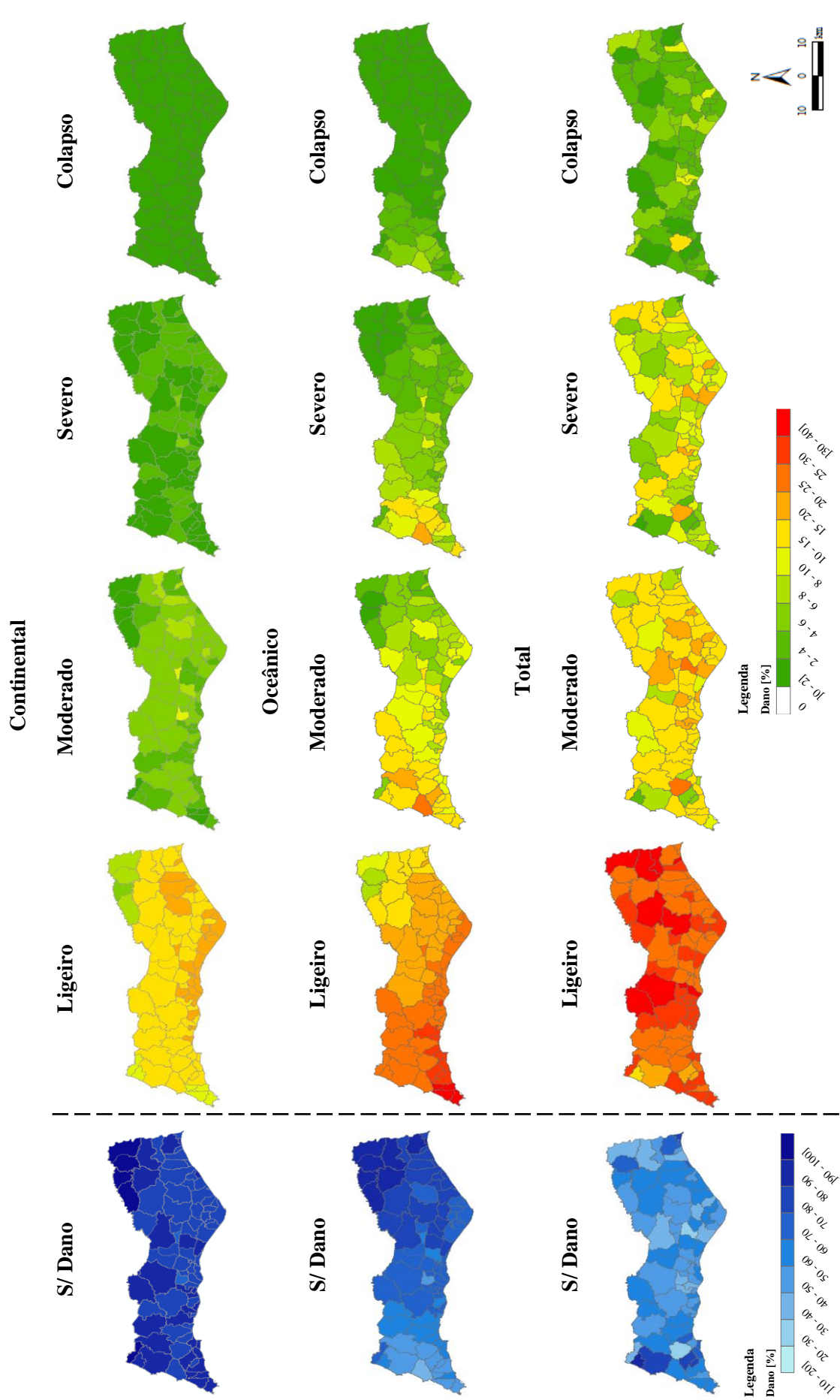


Figura 6.5: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo EC8 e Leis de Atenuação da Hipótese I (Ambraseys *et al.* (1996) para ambiente tectónico continental e Carvalho (2007) para ambiente tectónico oceânico) de acordo com a Tabela 4.4.

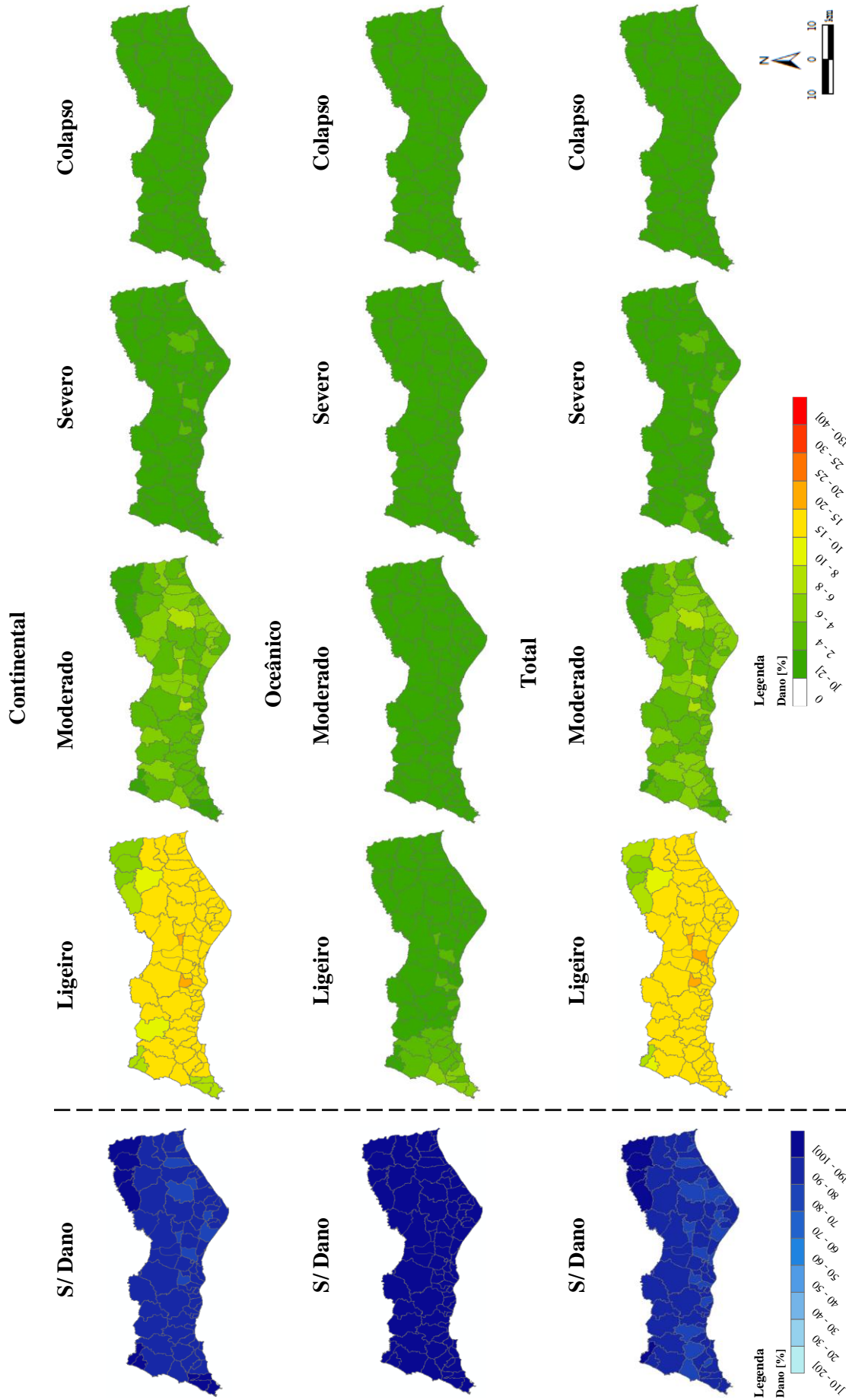


Figura 6.6: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo EC8 e Leis de Atenuação da Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico) de acordo com a Tabela 4.4.

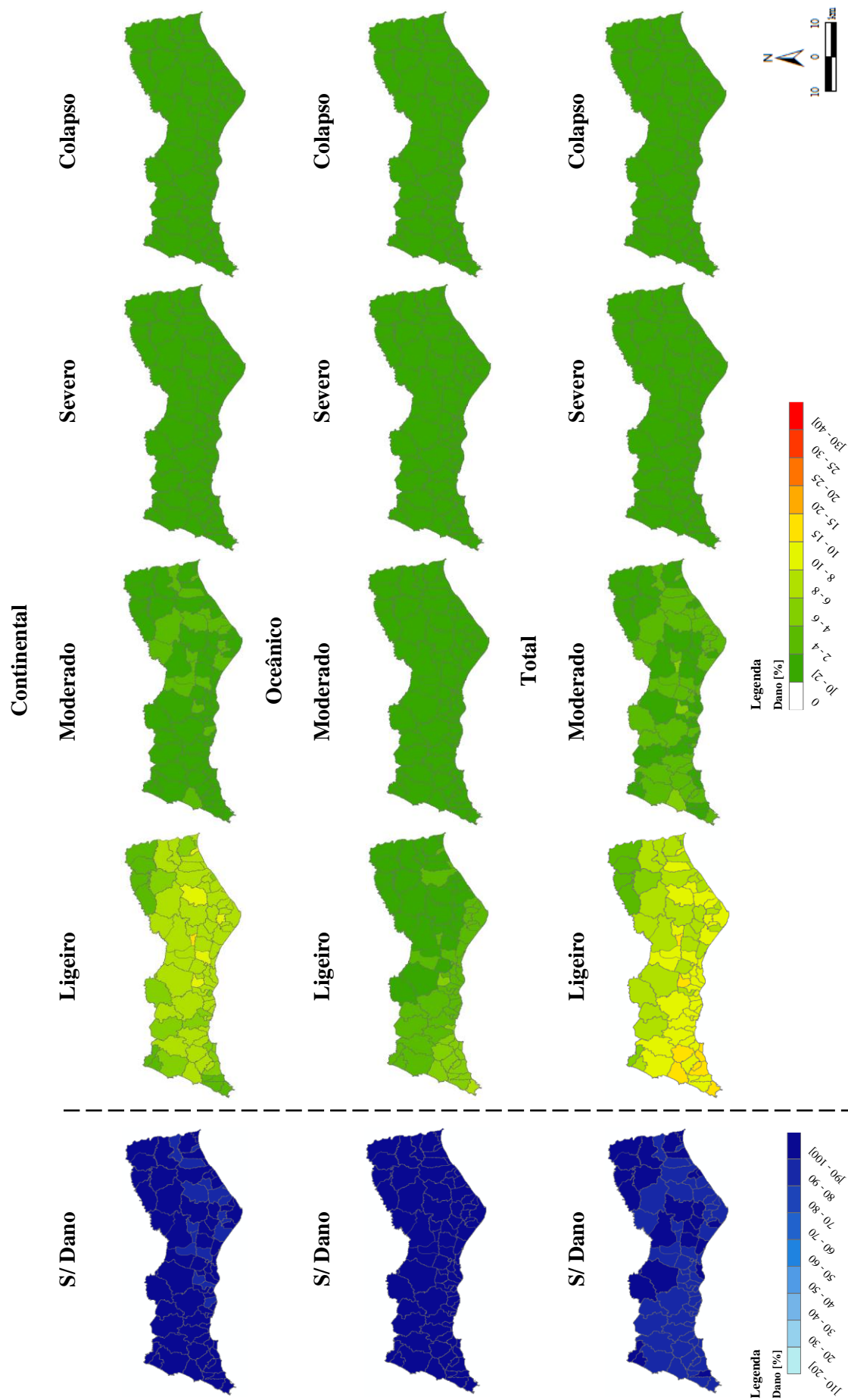


Figura 6.7: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo EC8 e Leis de Atenuação da Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

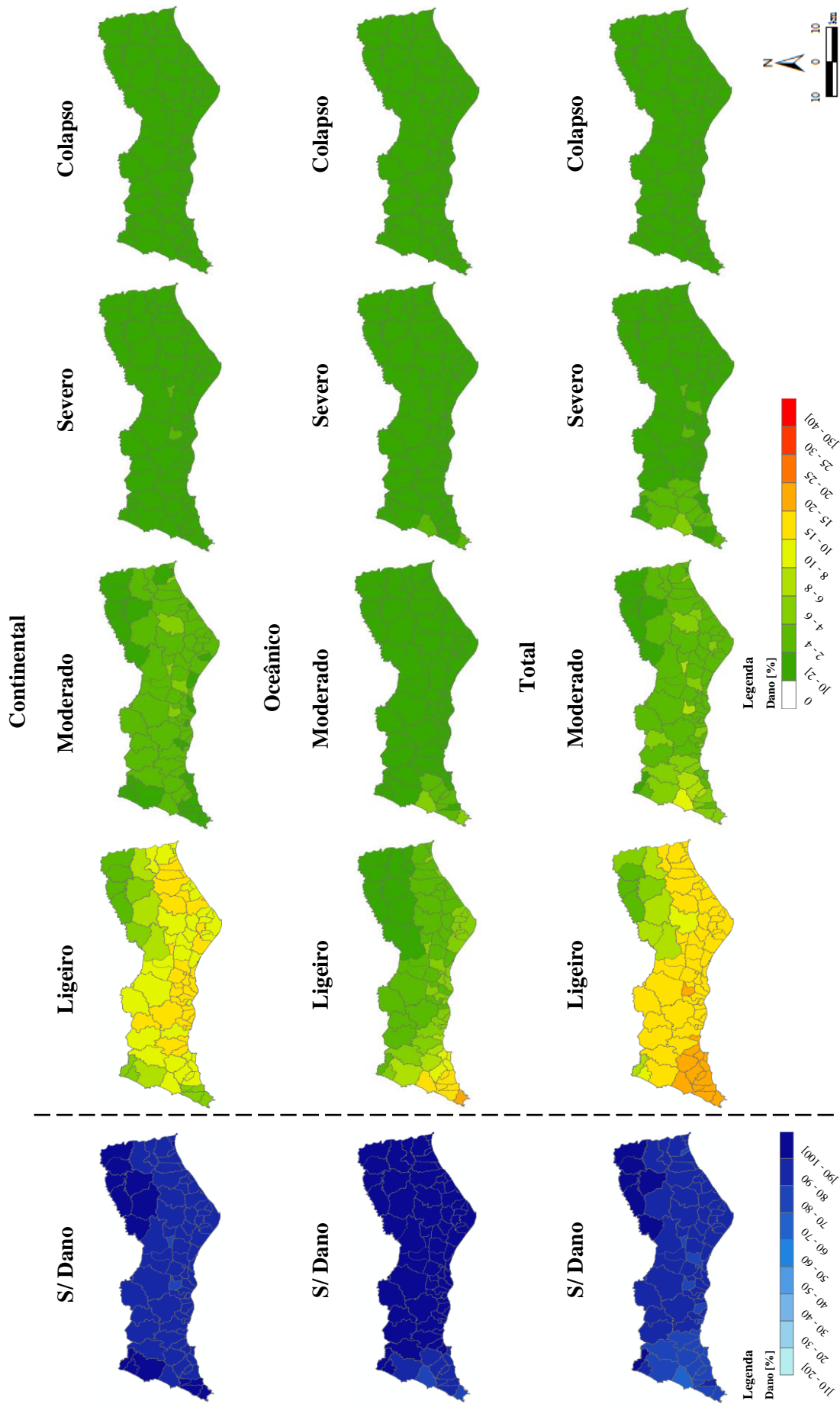


Figura 6.8: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo ERSTA e Leis de Atenuação da Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

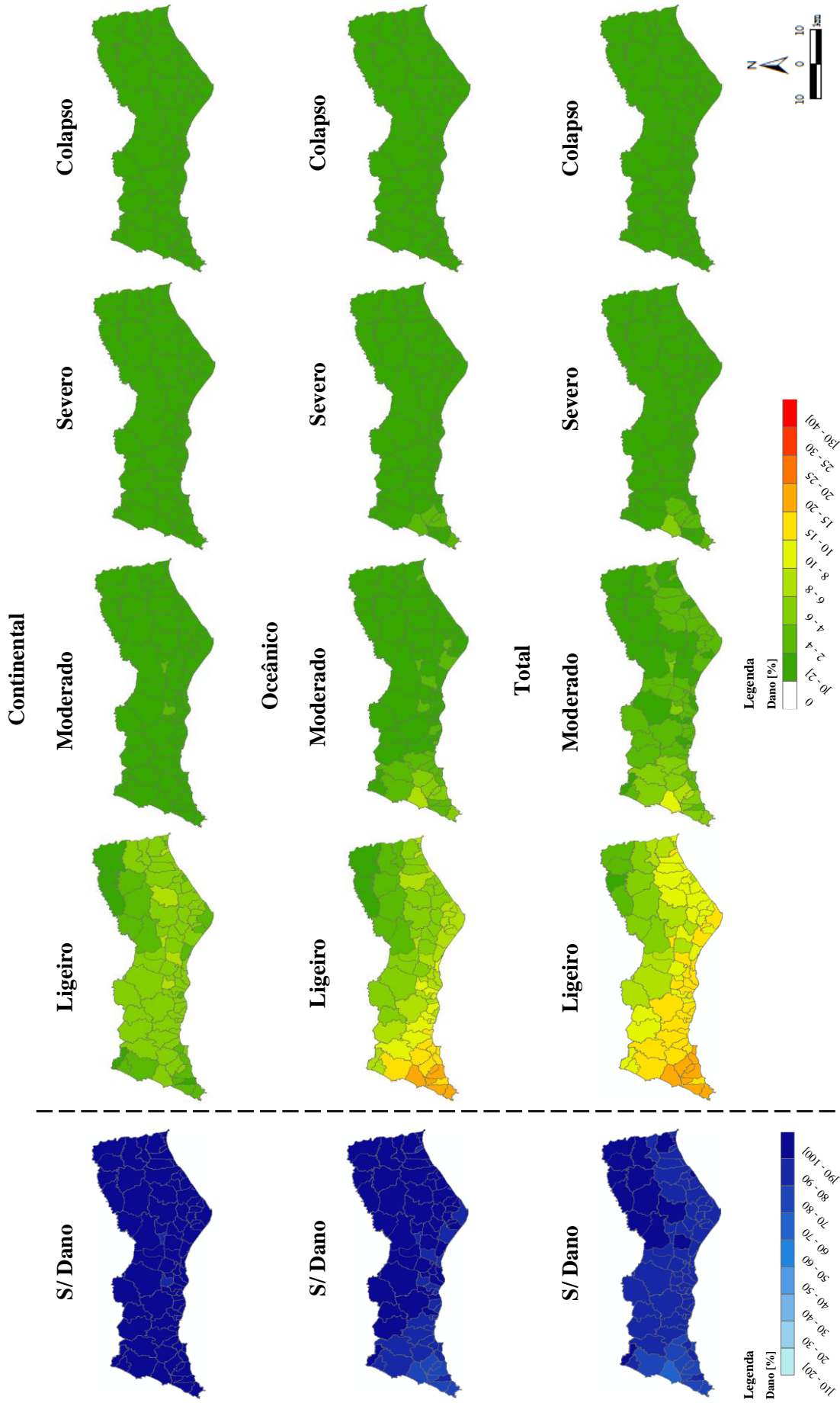


Figura 6.9: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo ERSTA e Leis de Atenuação da Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

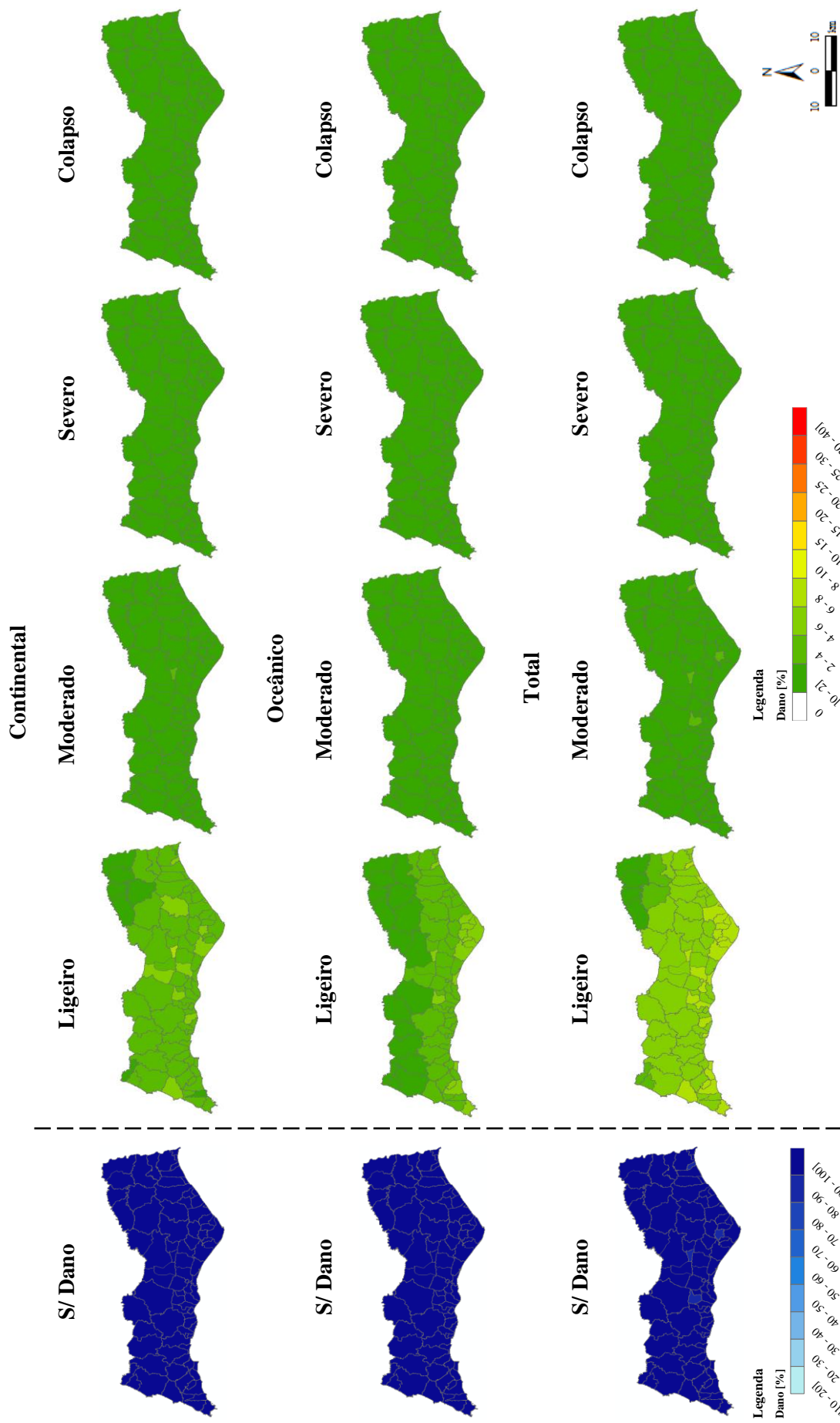


Figura 6.10: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo SHARE e Leis de Atenuação da Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

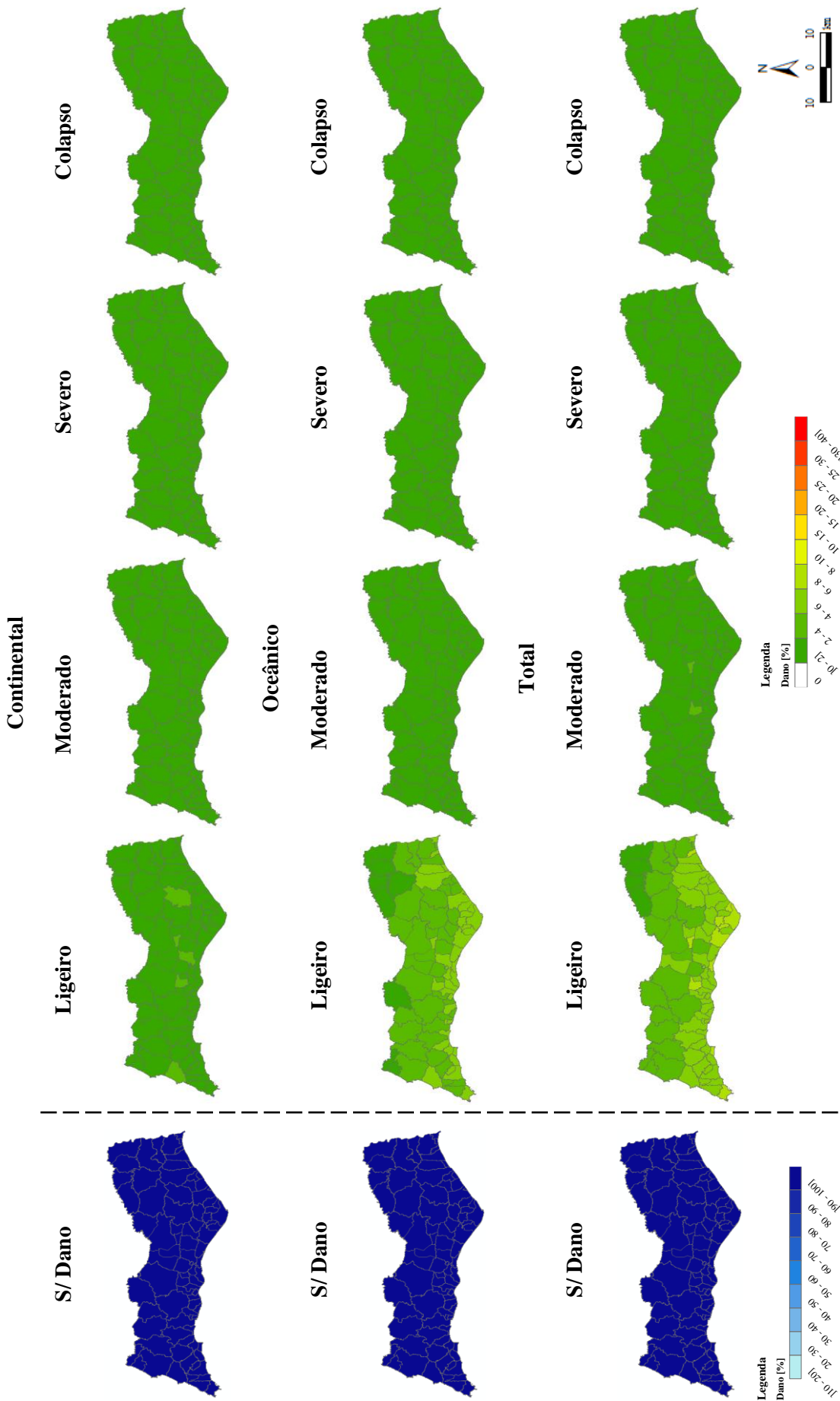


Figura 6.11: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo SHARE e Leis de Atenuação da Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

Como referido na secção 4.2, com o objetivo de a perigosidade sísmica apenas refletir as opções tomadas para o processo de ocorrência sísmica, os modelos são comparados com a mesma lei de atenuação. A dificuldade em identificar um modelo ideal para a previsão das amplitudes dos movimentos do solo para uma dada região em particular é uma realidade. Assim, a perigosidade sísmica também é comparada para os três modelos, para diferentes leis de atenuação.

A lei de Gutenberg-Richter traduz a relação entre o número de eventos sísmicos que ocorrem numa dada região num determinado período de tempo e a sua magnitude (secção 3.1.1). As zonas sismogénicas propostas nos diferentes modelos são regidas por diferentes variantes da lei de Gutenberg-Richter. Este facto é facilmente constatado se tivermos em conta os parâmetros característicos de cada zona de geração sísmica (secção 4.1). As diferenças entre as relações frequência-magnitude condicionarão a ação sísmica obtida a partir de cada modelo.

Na Figura 6.12 podemos observar a lei de Gutenberg-Richter truncada para a zona do Golfo de Cádiz, correspondente a cada um dos modelos considerados neste estudo.

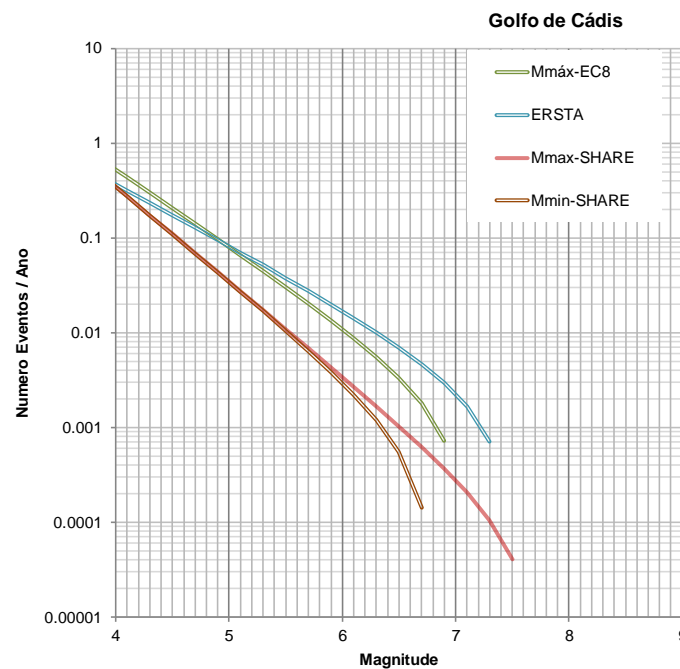


Figura 6.12: Lei de Gutenberg-Richter truncada, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE (considerando o valor mínimo, M_{min} , e máximo, M_{max} , da magnitude máxima), para a zona do Golfo de Cádiz (Carvalho e Malfeito, 2017).

Observando a Figura 6.12, podemos aferir que para períodos de retorno mais baixos ($T_R = 1/N_a$, em que $N_a = n^{\circ} \text{ de eventos / ano}$) há uma maior possibilidade da magnitude máxima ser idêntica para duas zonas sismogénicas propostas por diferentes modelos. Essa possibilidade diminui à medida que o período de retorno aumenta. Pode concluir-se que as diferenças entre as leis de Gutenberg-Richter são maiores para períodos de retorno mais longos.

As diferenças entre as leis de Gutenberg-Richter para períodos de retorno mais longos têm grande influência nos intervalos de recorrência para iguais magnitudes e, conseqüentemente, em diferentes níveis de perigosidade sísmica para a região.

De forma a entender como é que a perigosidade sísmica, associada a cada um dos modelos, se apresenta para períodos de retorno mais longos, esta foi calculada para o período de retorno de 2475 anos e, conseqüentemente, também o risco sísmico da região. Somente os modelos ERSTA e SHARE foram calculados para este período de retorno, concentrando a análise nestes dois modelos, uma vez que o modelo EC8 se encontra em fase de avaliação e adaptação aos conhecimentos de hoje.

Nas Figuras 6.13 e 6.14 apresentam-se os mapas de perigosidade sísmica para uma probabilidade de excedência de 2% em 50 anos, que corresponde ao período de retorno de 2475 anos.

Nas Figuras 6.15 a 6.18 são apresentados os mapas de risco sísmico para cada um dos estados de dano já mencionados.

A região de Portugal continental em foco neste estudo é o Algarve, no entanto, também se obtiveram mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental para probabilidades de excedência de 10% e 2% em 50 anos, para os modelos EC8, ERSTA e SHARE com as leis de atenuação mencionadas nas Hipóteses 1, 2 e 3 apresentadas na Tabela 4.4. Estes mapas encontram-se nos Anexos A e B.

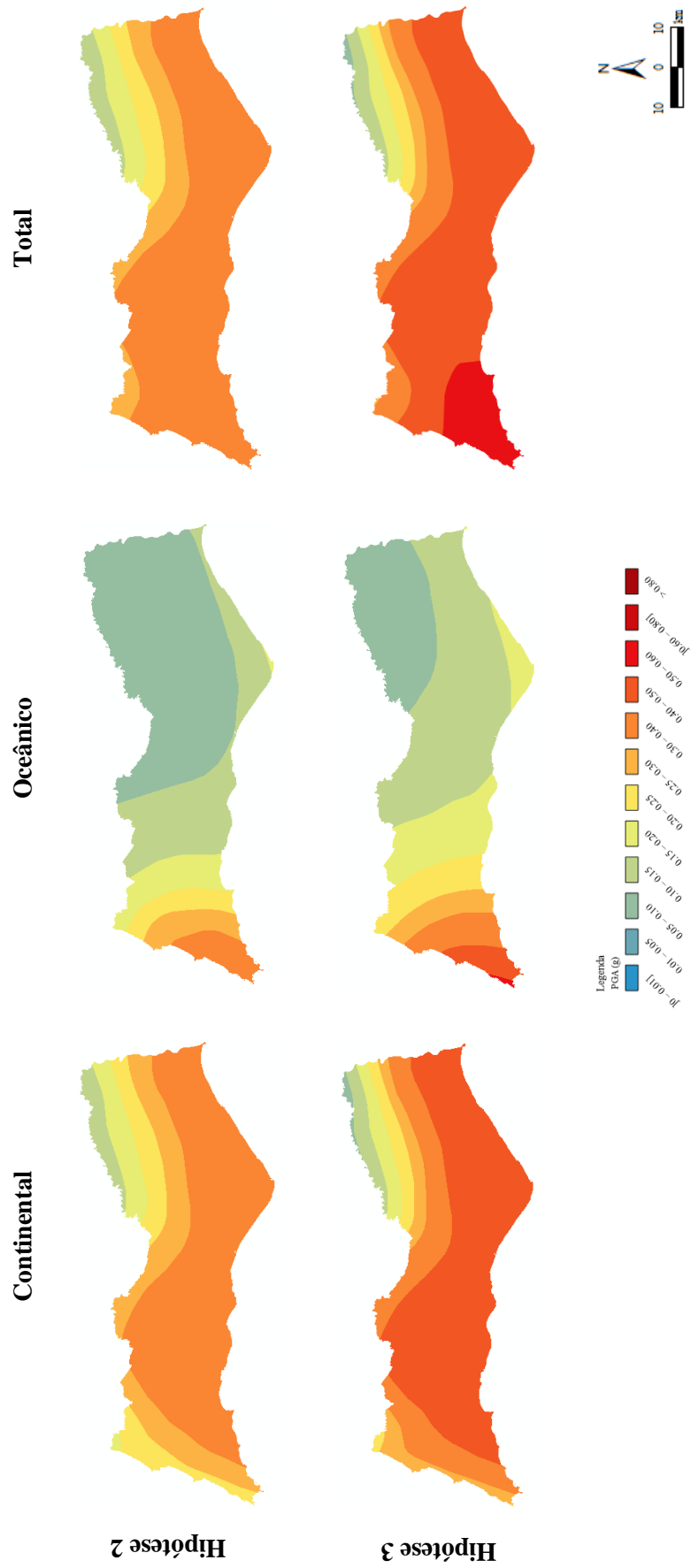


Figura 6.13: Mapas de perigosidade sísmica para o Algarve para uma probabilidade de excedência de 2% em 50 anos, com o Modelo ERSTA com a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Chiou & Youngs (2006), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico) e Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

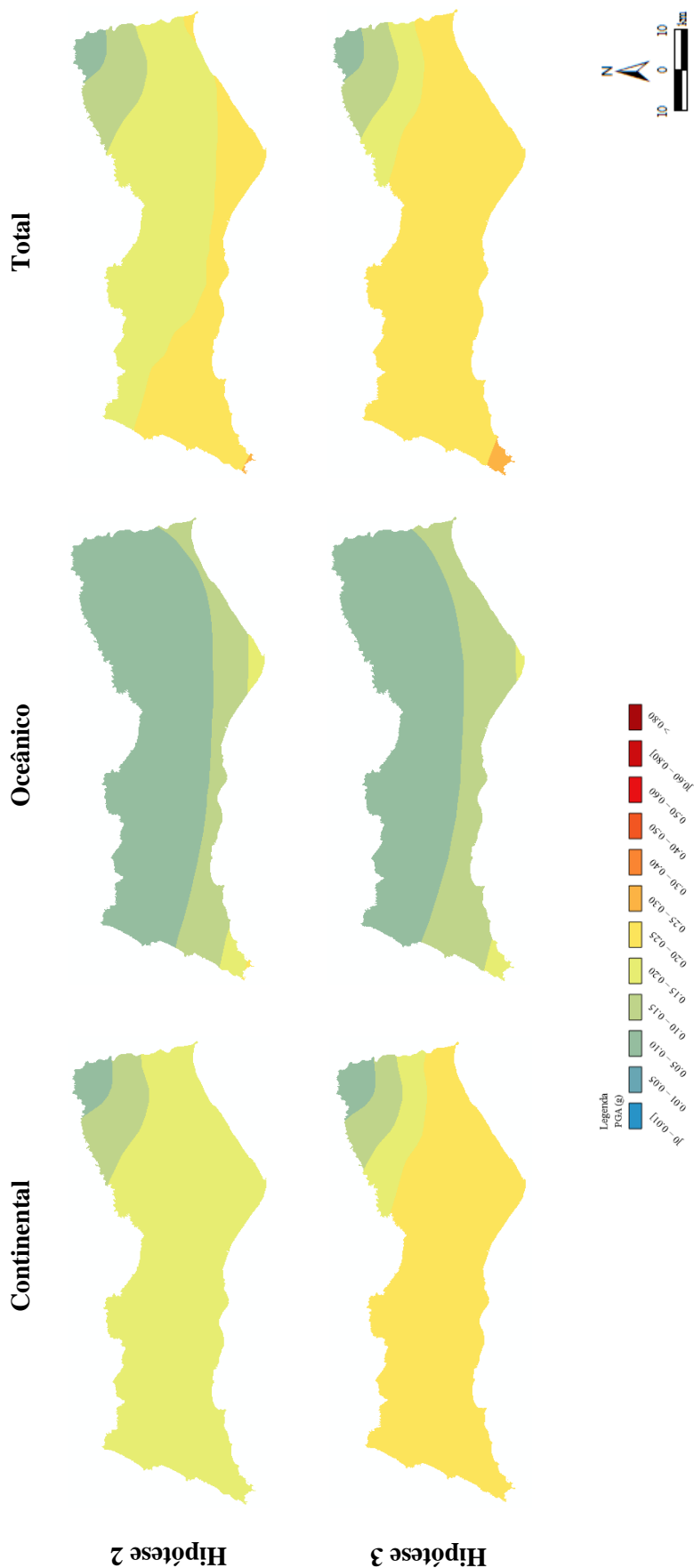


Figura 6.14: Mapas de perigosidade sísmica para o Algarve para uma probabilidade de excedência de 2% em 50 anos, com o Modelo SHARE com a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico) e Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

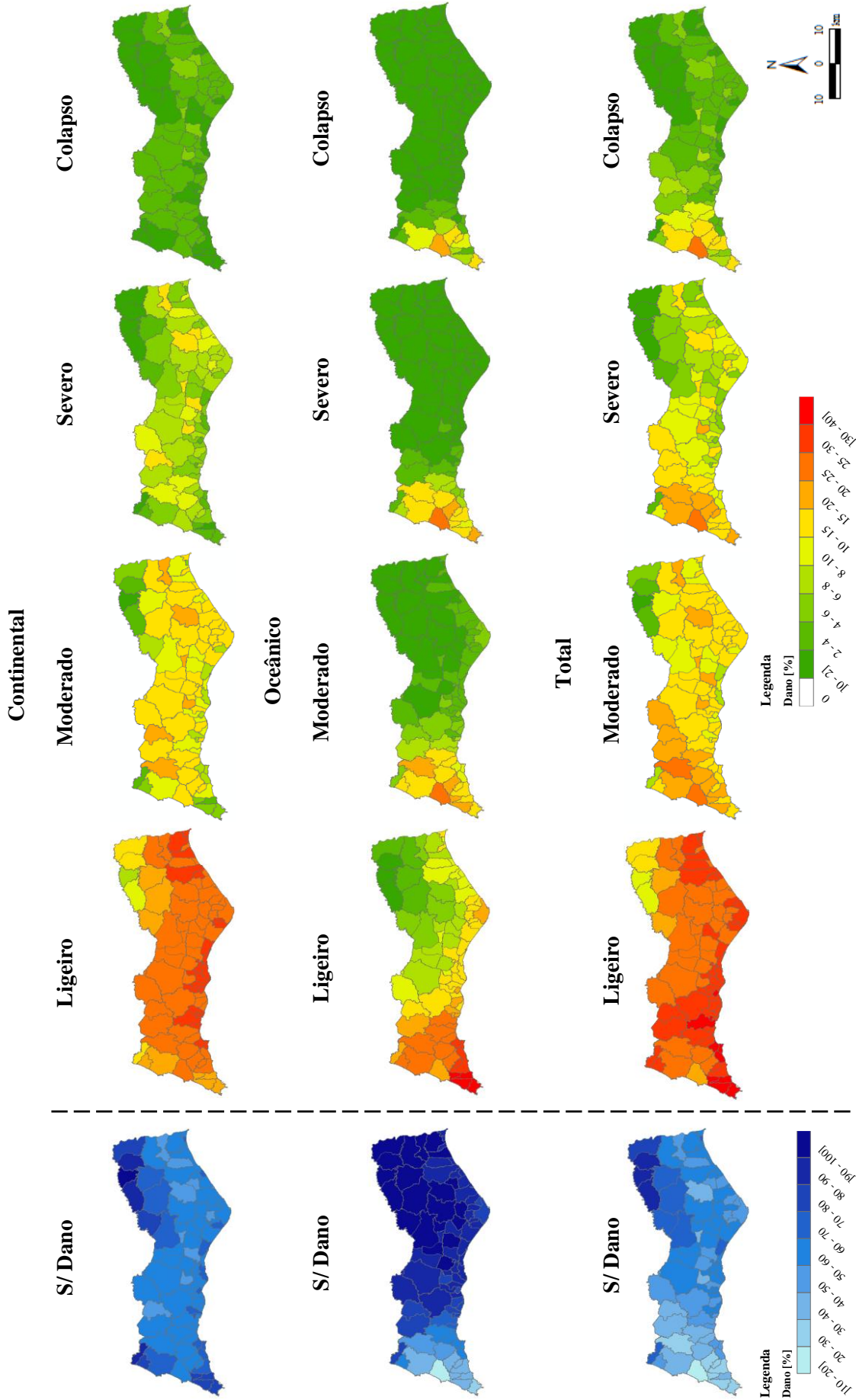


Figura 6.15: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo ERSTA e Leis de Atenuação da Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiu & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiu & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

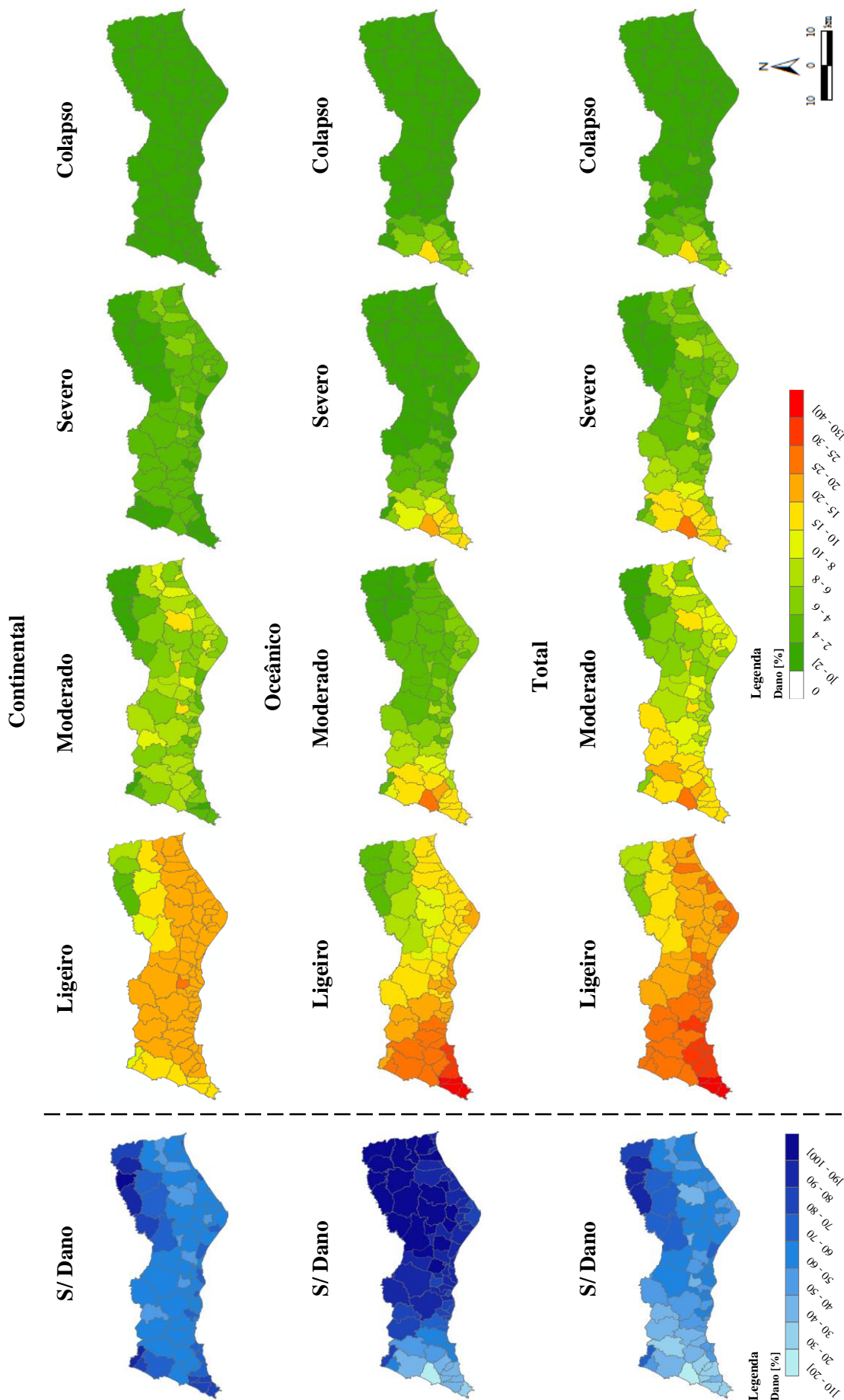


Figura 6.16: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo ERSTA e Leis de Atenuação da Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

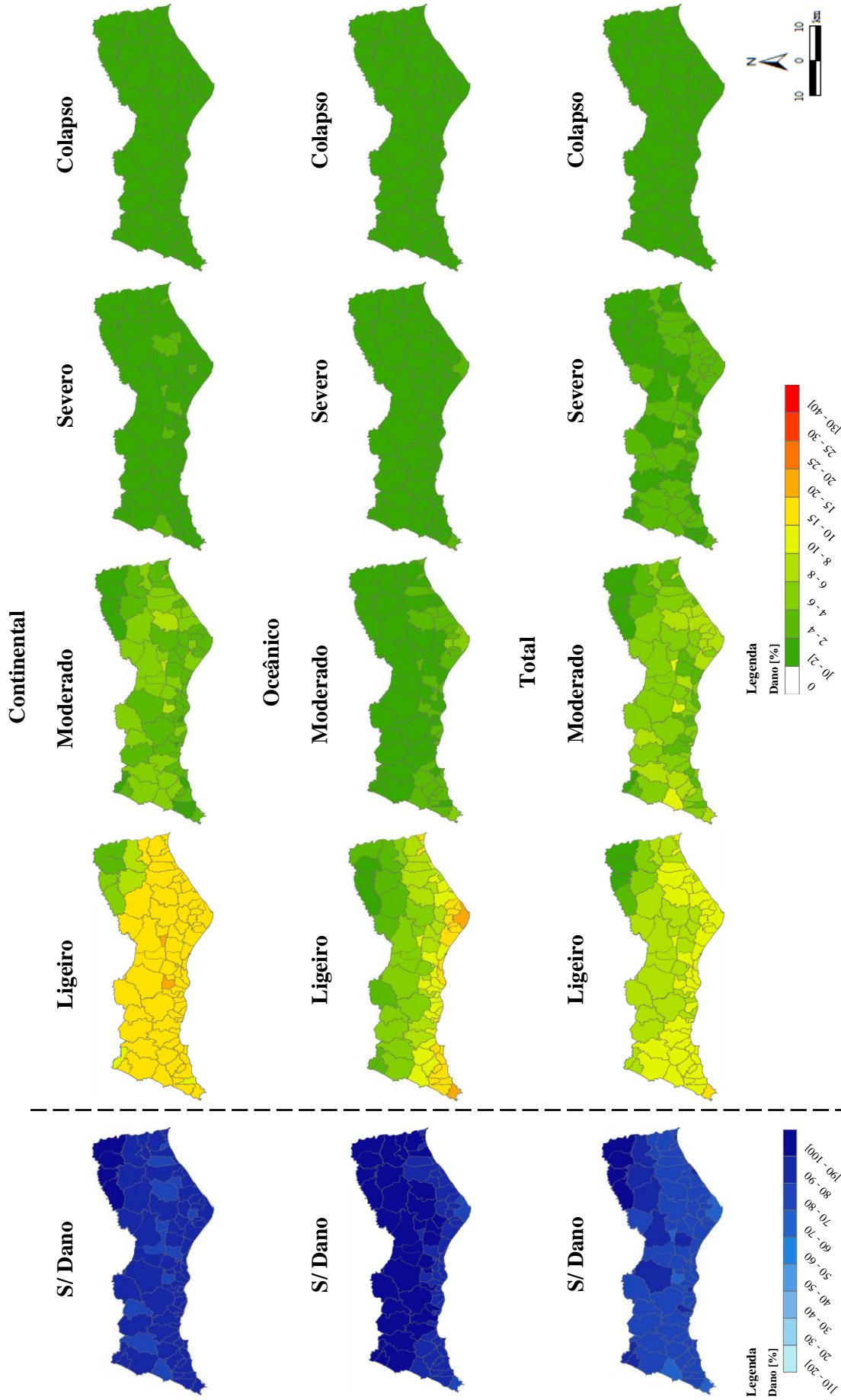


Figura 6.17: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo SHARE e Leis de Atenuação da Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

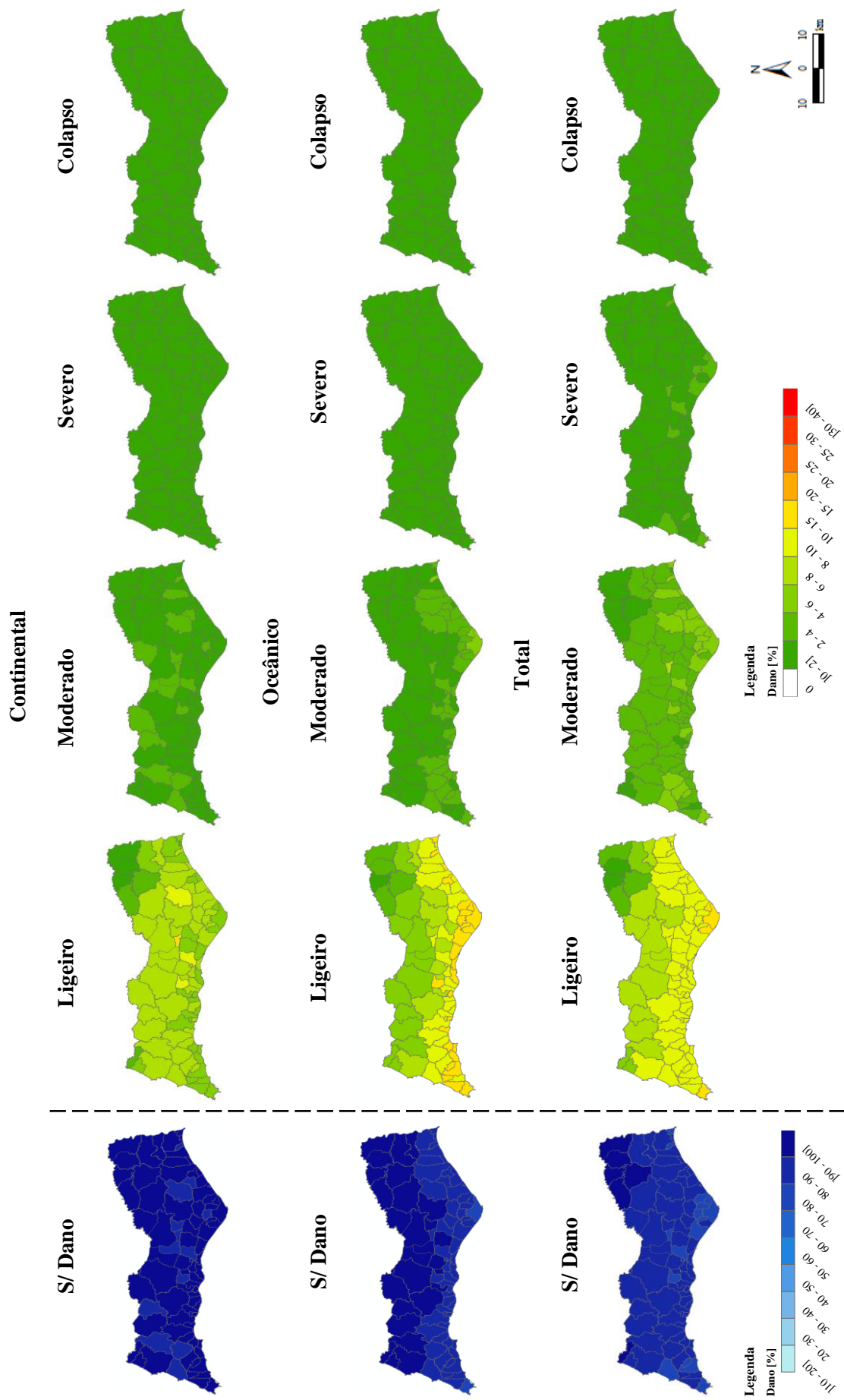


Figura 6.18: Mapas de risco sísmico para o Algarve com o Modelo SHARE e Leis de Atenuação da Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

6.3. Discussão

Considerando os mapas de perigosidade sísmica para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos, correspondente a um período de retorno de 475 anos (Figuras 6.2, 6.3 e 6.4), é possível observar que estes apresentam diferenças entre os modelos, considerando a mesma lei de atenuação e também quando é considerado um modelo em particular, aplicando diferentes conjuntos de leis de atenuação (Tabela 4.4). Estas diferenças são observadas no ambiente tectónico continental, oceânico e, conseqüentemente, no mapa total que reflete a influência continental e oceânica em conjunto.

Ao observar a Figura 6.2, que apresenta os mapas de perigosidade sísmica correspondentes ao modelo EC8, verifica-se, com a Hipótese 1 das leis de atenuação, uma maior influência oceânica do que continental, principalmente na zona sudoeste do Algarve, o que condiciona o resultado obtido no mapa total. No caso das Hipóteses 2 e 3, há uma maior influência continental que se reflete no mapa total obtido. Se se considerar os mapas de perigosidade sísmica para o modelo ERSTA e SHARE, Figuras 6.3 e 6.4, respetivamente, observa-se, independentemente da Hipótese de leis de atenuação escolhida, uma maior influência continental, que é espelhada no mapa total.

Considerando os três modelos (Figuras 6.2, 6.3 e 6.4), verifica-se que as diferenças são mais significativas entre os modelos considerando o mesmo conjunto de leis de atenuação do que as diferenças observadas nos resultados de perigosidade sísmica de cada modelo quando aplicados diferentes conjuntos de leis de atenuação. Em suma, independentemente do conjunto de leis de atenuação usado, as diferenças observadas entre os três modelos são sempre mais significativas. Estas diferenças refletem as opções tomadas aquando da definição das zonas sismogénicas e respetivos parâmetros.

As diferentes ações sísmicas derivadas a partir de cada um dos três modelos podem condicionar os resultados obtidos para a avaliação do risco sísmico da região.

Se se considerar os mapas de risco sísmico obtidos para o modelo EC8 com cada um dos conjuntos de leis de atenuação (Figuras 6.5, 6.6 e 6.7), pode observar-se que estes apresentam diferenças significativas entre si, principalmente para os estados de dano Ligeiro, Moderado e Severo. Isto reflete o observado nos mapas de perigosidade: para um mesmo modelo existem diferenças nos resultados, conseqüência do conjunto de leis de atenuação usado. A partir dos resultados de risco sísmico obtidos para o modelo ERSTA (Figuras 6.8 e 6.9) e para o modelo SHARE (Figuras 6.10 e 6.11) é possível retirar a mesma conclusão; no entanto, são somente os estados de dano Ligeiro e Moderado que mostram maiores diferenças.

Analisando os três modelos para um mesmo conjunto de leis de atenuação, também se observam resultados diferentes (Figuras 6.6, 6.8 e 6.10, por exemplo). Mais uma vez, o risco sísmico reflete os resultados obtidos para a perigosidade sísmica: os modelos apresentam diferenças entre si para um mesmo conjunto de leis de atenuação.

Na maioria dos mapas de risco sísmico pode observar-se a maior influência continental, espelhada nos mapas totais, de acordo com o que foi observado nos mapas de perigosidade.

Assim, a partir dos resultados obtidos para o risco sísmico também é possível concluir que as diferenças observadas entre os modelos são mais significativas do que as diferenças obtidas para um mesmo modelo, aplicando diferentes conjuntos de leis de atenuação.

As diferenças entre as leis de Gutenberg-Richter correspondentes a diferentes zonas de geração sísmica são maiores para períodos de retorno mais longos (Figura 6.12). Estas diferenças têm grande influência nos intervalos de recorrência para iguais magnitudes e, conseqüentemente, em diferentes

níveis de perigosidade sísmica para a região. É neste facto que reside a razão pela qual também foi calculada a perigosidade e o risco sísmico para um período de retorno mais longo, 2475 anos.

Analisando os mapas de perigosidade sísmica para uma probabilidade de excedência de 2% em 50 anos (Figuras 6.13 e 6.14), que corresponde ao período de retorno de 2475 anos, observa-se em geral uma maior influência continental do que oceânica, em concordância com o que se observou nos mapas de perigosidade sísmica para um período de retorno mais baixo.

Para este período de retorno, os modelos apresentam diferenças entre si considerando a mesma lei de atenuação e também quando se tem em conta um modelo em particular, aplicando diferentes conjuntos de leis de atenuação, tal como foi observado nos resultados obtidos para o período de retorno de 475 anos. Esta análise é corroborada pelo que se pode ver nas Figuras 6.13 e 6.14, que correspondem ao modelo ERSTA e ao modelo SHARE, respetivamente. Estas diferenças são observadas tanto no ambiente tectónico continental como oceânico, bem como no mapa total.

Nos mapas de perigosidade sísmica para o período de retorno de 2475 anos também é possível observar que, independentemente da Hipótese de leis de atenuação escolhida, existe uma maior influência continental, que influencia o obtido no mapa total.

Considerando os mapas de risco sísmico obtidos para o modelo ERSTA com cada um dos conjuntos de leis de atenuação (Figuras 6.15 e 6.16), pode observar-se que estes apresentam diferenças significativas entre si, em todos os estados de dano. A partir dos resultados de risco sísmico obtidos o modelo SHARE (Figuras 6.17 e 6.18) é possível retirar a mesma conclusão, no entanto, as maiores diferenças são visíveis apenas nos estados de dano Ligeiro e Moderado. Tal como para o período de retorno de 475 anos, os mapas de risco sísmico para o período de retorno de 2475 anos refletem o que é observado nos mapas de perigosidade, mostrando que para um mesmo modelo existem diferenças nos resultados, consequência do conjunto de leis de atenuação usado.

Ao examinar os resultados obtidos para os modelos ERSTA e SHARE para um mesmo conjunto de leis de atenuação, observam-se igualmente resultados diferentes (Figuras 6.15 e 6.17, por exemplo). O risco sísmico reflete, mais uma vez, o que é observado nos mapas de perigosidade.

Para um período de retorno mais longo também se observa, na maioria dos mapas de risco sísmico, a maior influência continental, espelhada nos mapas totais, de acordo com o que foi observado nos mapas de perigosidade.

A partir dos resultados obtidos para o risco sísmico para um período de retorno de 2475 anos é possível concluir que as diferenças observadas entre os modelos são mais significativas do que as diferenças obtidas para um mesmo modelo, aplicando diferentes conjuntos de leis de atenuação, tal como o observado para o período de retorno de 475 anos.

As diferenças observadas nos resultados obtidos para os períodos de retorno de 475 anos e 2475 anos, comprovam que as diferentes ações sísmicas derivadas a partir de cada modelo condicionam os resultados obtidos para a avaliação do risco sísmico da região.

Ao comparar os resultados da perigosidade sísmica obtidos para o período de retorno de 475 anos com os resultados correspondentes ao período de retorno de 2475 anos, observa-se que a influência oceânica é mais significativa para períodos de retorno mais longos (Figuras 6.3 e 6.13, por exemplo). Esta influência reflete-se particularmente no sudoeste algarvio e é mais expressiva no modelo ERSTA do que no modelo SHARE. Para as zonas a Sudoeste de Portugal, os valores do parâmetro *b-value* bem mais elevados no modelo SHARE do que no modelo ERSTA tiram relevância a estas zonas sismogénicas na sua capacidade de geração de sismos de elevada magnitude, para baixas probabilidades de excedência (elevados períodos de retorno).

Consequentemente, para os resultados de risco sísmico obtidos para os dois períodos de retorno, também se observa uma influência oceânica mais significativa, refletida nos mapas totais, para períodos de retorno mais longos (Figuras 6.8 e 6.15, por exemplo). Em relação aos danos no edificado, também se observa valores mais elevados de percentagem de dano para períodos de retorno mais longos e as diferenças observadas entre os modelos estendem-se a todos os estados de dano.

Em suma, para um período de retorno mais longo, observam-se igualmente diferenças para um mesmo modelo, considerando conjuntos de leis de atenuação diferentes, e entre os modelos, tal como para um período de retorno mais curto. No entanto, para períodos de retorno mais longos os resultados obtidos, tanto para a perigosidade como para o risco sísmico, são mais gravosos.

Também se observa que, independentemente do período de retorno e do conjunto de leis de atenuação utilizado, o modelo ERSTA é mais gravoso que o modelo SHARE. Então, importa saber quão mais gravoso o modelo ERSTA é em relação ao modelo SHARE.

Nas Figuras 6.19 e 6.20 apresenta-se o rácio entre os modelos ERSTA e SHARE para os períodos de retorno de 475 anos e 2475 anos, respetivamente. É possível observar que, para o período de retorno de 475 anos e tendo em conta os mapas totais, o modelo ERSTA é ~2 a 2.5 vezes maior que o modelo SHARE, quando aplicada a Hipótese 2 ou a Hipótese 3 das leis de atenuação. Em relação ao período de retorno de 2475 anos, constata-se que, em geral, o modelo ERSTA é ~2.5 a 3 vezes maior que o modelo SHARE, quando aplicada a Hipótese 2 e são muito semelhantes, com uma pequena diferença no sudoeste algarvio, quando aplicada a Hipótese 3.

Comparando os mapas para os dois períodos de retorno, verifica-se que há um aumento do rácio entre os modelos para o ambiente tectónico oceânico, ao contrário do que acontece no ambiente tectónico continental. O que se observa nas Figuras 6.19 e 6.20 reforça a conclusão mencionada anteriormente, mostrando que para períodos de retorno mais longos a influência oceânica é mais significativa.

De um modo geral, ao observar os vários mapas de risco apresentados, pode-se concluir que as zonas que poderão sofrer uma maior percentagem de danos, independentemente do estado de dano, são as regiões sul e sudoeste do Algarve. Recuperando a Figura 4.9, em que é apresentada a distribuição das tipologias construtivas presentes no parque habitacional do Algarve, de acordo com a classificação FEMA & NIBS, observa-se que as regiões sul e sudoeste têm uma maior percentagem de edifícios das tipologias “BA 1961-85” e “BA 1986-11”, que podem ser consideradas as tipologias mais resistentes dentro das 7 classes tipológicas apresentadas. As zonas em que se encontra um maior número destes edifícios são os grandes centros urbanos da região, conhecidas pelo turismo e com um grande número de infraestruturas (Figura 4.8).

Assim, embora estas regiões tenham um maior número de edifícios de tipologias possivelmente mais resistentes, a existência de edifícios de tipologias menos resistentes (numa menor percentagem) levam a que estas zonas sejam mais suscetíveis a sofrer danos com a ocorrência de um evento sísmico.

Em suma, considerando o facto de as diferenças entre os modelos prevalecerem sobre as diferenças observadas entre os diferentes conjuntos de leis de atenuação aplicados num mesmo modelo, é possível inferir que as diferenças observadas residem nas opções tomadas inicialmente pelos autores dos três modelos. Os modelos de perigosidade sísmica apresentam implicações diretas no risco e as diferenças observadas mostram que as opções tomadas *à priori* são de primordial importância.

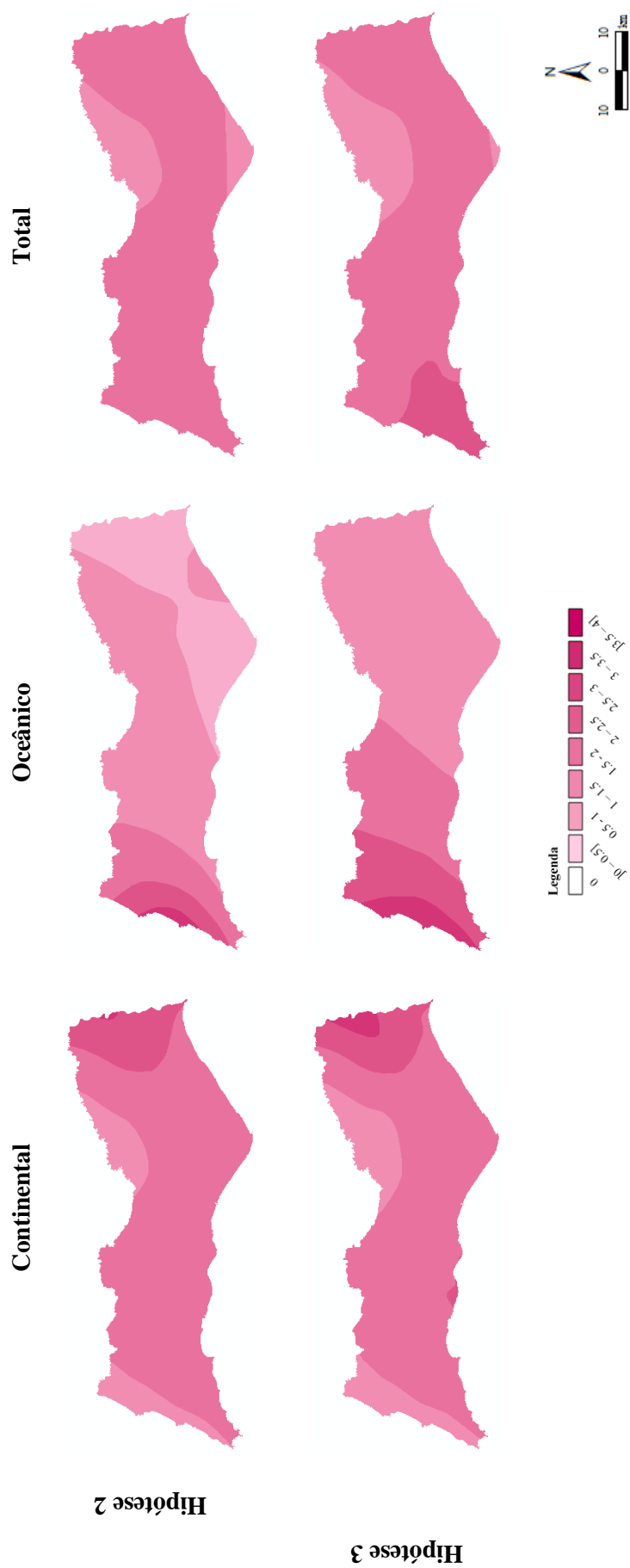


Figura 6.19: Rácio entre os modelos ERSTA/SHARE para as Hipóteses 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiu & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiu & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico) e 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico) das leis de atenuação (Tabela 4.4) para um período de retorno de 475 anos.

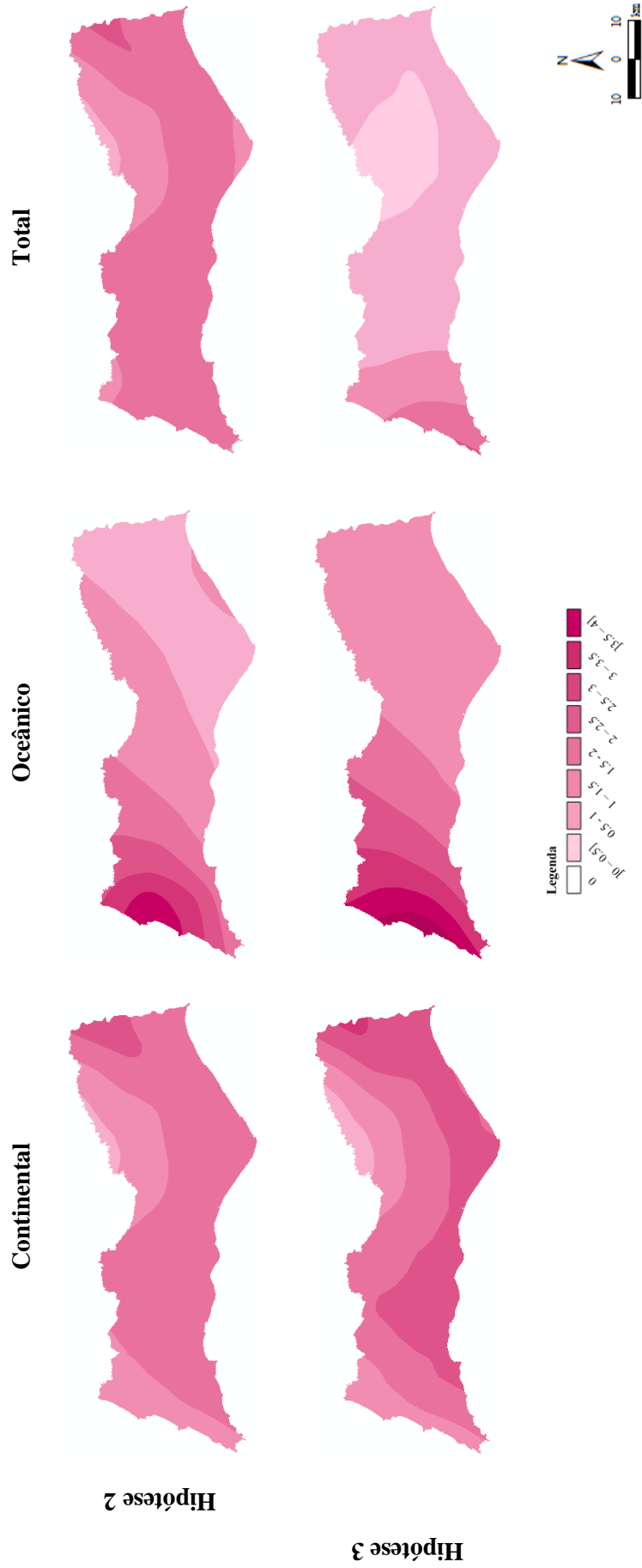


Figura 6.20: Rácio entre os modelos ERSTA/SHARE para as Hipóteses 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico) e 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico) das leis de atenuação (Tabela 4.4) para um período de retorno de 2475 anos.

Capítulo 7

Conclusões

Uma das variáveis constituintes da convolução aplicada para a obtenção do risco sísmico é a perigosidade sísmica. Deste modo, é de elevado interesse entender qual a sua influência na avaliação do risco sísmico de uma dada região.

As três propostas de modelos distintos de zonas sismogénicas para Portugal continental – modelo EC8, modelo ERSTA e modelo SHARE – deram origem a diferentes mapas de perigosidade sísmica. Tendo em conta as diferenças encontradas, principalmente para a região sul de Portugal, procedeu-se a uma análise de forma a compreender as diferenças observadas nos mapas de perigosidade sísmica e estudar o seu impacto nas estimativas do risco sísmico para a região sul de Portugal.

Considerando os mapas de perigosidade sísmica para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos (período de retorno de 475 anos) e de 2% em 50 anos (período de retorno de 2475 anos) é possível observar que estes apresentam diferenças entre os modelos, considerando a mesma lei de atenuação e também quando é considerado um modelo em particular, aplicando diferentes conjuntos de leis de atenuação. Tendo em conta os três modelos, verifica-se que as diferenças são mais significativas entre os modelos quando é considerado o mesmo conjunto de leis de atenuação.

Em suma, independentemente do período de retorno e do conjunto de leis de atenuação usado, as diferenças observadas entre os três modelos são sempre mais significativas. Estas diferenças refletem as opções tomadas aquando da definição das zonas sismogénicas e respetivos parâmetros.

As diferentes ações sísmicas derivadas a partir de cada um dos três modelos podem condicionar os resultados obtidos para a avaliação do risco sísmico da região.

Considerando os mapas de risco sísmico obtidos para o período de retorno de 475 anos e de 2475 anos, pode-se observar que estes apresentam diferenças significativas entre si, principalmente para os estados de dano Ligeiro e Moderado.

Analisando os três modelos para um mesmo conjunto de leis de atenuação, também se observam resultados diferentes. Mais uma vez, o risco sísmico reflete os resultados obtidos para a perigosidade sísmica: os modelos apresentam diferenças entre si para um mesmo conjunto de leis de atenuação.

Assim, a partir dos resultados obtidos para o risco sísmico também é possível concluir que as diferenças observadas entre os modelos são mais significativas do que as diferenças obtidas para um mesmo modelo, aplicando diferentes conjuntos de leis de atenuação.

As diferenças observadas nos resultados obtidos para os períodos de retorno de 475 anos e 2475 anos, comprovam que as diferentes ações sísmicas derivadas a partir de cada modelo condicionam os resultados obtidos para a avaliação do risco sísmico da região.

Ao comparar os resultados da perigosidade e risco sísmico obtidos para o período de retorno de 475 anos com os resultados correspondentes ao período de retorno de 2475 anos, observa-se uma grande influência continental, que se sobrepõe à influência oceânica, independente da Hipótese de leis de atenuação escolhida ou do modelo observado. No entanto, a influência oceânica é mais significativa para períodos de retorno mais longos, em particular no sudoeste algarvio.

Independentemente do período de retorno e do conjunto de leis de atenuação utilizado, o modelo ERSTA é sempre mais gravoso que o modelo SHARE, cerca de 1.5 a 4 vezes maior. Comparando os mapas de rácio entre os dois modelos para os dois períodos de retorno, verifica-se que há um aumento do rácio para o ambiente tectónico oceânico, ao contrário do que o que acontece no ambiente tectónico continental, mostrando que para períodos de retorno mais longos a influência oceânica é mais significativa.

Em relação aos danos no edificado, observam-se valores mais elevados de percentagem de dano para períodos de retorno mais longos e as diferenças observadas entre os modelos estendem-se a todos os estados de dano. De um modo geral, as zonas que poderão sofrer uma maior percentagem de danos, independentemente do estado de dano, são as regiões sul e sudoeste do Algarve. Estas regiões têm uma maior percentagem de edifícios das tipologias “BA 1961-85” e “BA 1986-11”, que podem ser consideradas as tipologias mais resistentes dentro das 7 classes tipológicas apresentadas. As zonas em que se encontra um maior número destes edifícios são os grandes centros urbanos da região, conhecidas pelo turismo e com um grande número de infraestruturas. Assim, embora estas regiões tenham um maior número de edifícios de tipologias possivelmente mais resistentes, a presença de edifícios de tipologias menos resistentes leva a que estas zonas sejam mais suscetíveis a sofrer danos com a ocorrência de um evento sísmico.

Em suma, considerando o facto de as diferenças entre os modelos prevalecerem sobre as diferenças observadas entre os diferentes conjuntos de leis de atenuação aplicados num mesmo modelo, é possível inferir que as diferenças observadas residem nas opções tomadas inicialmente pelos autores dos três modelos. Os modelos de perigosidade sísmica apresentam implicações diretas no risco e as diferenças observadas mostram que as opções tomadas *à priori* são de extrema importância.

Em termos de trabalho futuro, é real a necessidade de uma investigação e avaliação mais rigorosa, criteriosa e séria da perigosidade sísmica, nomeadamente na definição dos parâmetros (número, localização, magnitude, etc.) das zonas sismogénicas. Para isso é necessário um conhecimento mais aprofundado relativamente às falhas sísmicas e a todas as estruturas tectónicas, que se encontram tanto em terra como em mar, que possam potenciar a geração de um evento sísmico e também um estudo mais detalhado (revisão) do catálogo sísmico. Todos estes fatores terão impacto direto no risco sísmico da região, tal como este trabalho mostra.

O Algarve é uma das regiões do país que mostrou diferenças mais significativas ao nível da perigosidade sísmica o que levou a que fosse o foco deste estudo, mas a região do Vale do Tejo e Área Metropolitana de Lisboa também apresentam diferenças alarmantes (Carvalho e Malfeito, 2016). A história mostra-nos que esta região do território continental português já sofreu significativamente com a ocorrência de eventos sísmicos e, em conjunto com a zona do globo em que o país se localiza, leva a uma preocupação crescente com a possibilidade da ocorrência de sismos tão potencialmente destruidores como o sismo de 1755. Este trabalho mostra que uma avaliação rigorosa da perigosidade sísmica é de extrema importância e que tem implicações no risco sísmico e, tendo em conta as diferenças também observadas para a região do Vale do Tejo enfatiza-se a importância de um estudo para esta região semelhante ao que se encontra apresentado nesta dissertação.

Referências

- Afonso, N., Carvalho, A. (2015). Atualização de um Simulador de Cenários Sísmicos em ambiente WebSIG. VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia.
- Akkar, S., Bommer, J. (2010). Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81(2), 195-206.
- Ambraseys, N., Simpson, K., Bommer, J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, 371-400.
- ANCP (2010). Estudo do Risco Sísmico e de tsunamis no Algarve. Edição: Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC).
- Atkinson, G., Boore, D. (2006). Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 96, No. 6, pages 2181-2205.
- Azevedo, J., Guerreiro, L., Bento, R., Lopes, M., Proença, J. (2009). Seismic vulnerability of lifelines in the greater Lisbon area. *Bull Earthquake Engineering*, 8, 157-180.
- Baptista, M., Miranda, J., Chierici, F., Zitellini, N. (2003). New study of the 1755 earthquake source based on multi-channel seismic survey data and tsunami modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 333-340.
- Cabral, J. (1993). Neotectónica de Portugal continental. Tese de Doutoramento em Geologia. Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Cabral, J. (1995). Neotectónica em Portugal continental. *Memórias do Instituto Geológico e Mineiro*, 31, Lisboa, 265pp.
- Cabral, J., Ribeiro, A. (1989). Carta neotectónica de Portugal. Nota explicativa. *Serviços Geológicos de Portugal*. Lisboa.
- Campbell, K. (2003). Prediction of Strong Ground Motion Using the Hybrid Empirical Method and Its Use in the Development of Ground Motion (Attenuation) Relations in Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 93, Number 3, pages 1012-1033, 2003.
- Campos Costa, A., Sousa, M. L., Carvalho, A., Bilé Serra, J., Martins, A., Carvalho, E. (2004). Simulador de Cenários Sísmicos integrado num Sistema de Informação Geográfica. 7º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, Págs. 455-464, Guimarães.
- Campos Costa, A., Sousa, M. L., Coelho, E. (2005). Building stock inventory and vulnerability data for Lisbon Metropolitan Area. *Relatório DE-NESDE*. LNEC, Lisboa.

- Campos Costa, A., Sousa, M. L., Carvalho, A., Coelho, E. (2006). Seismic loss scenarios based on hazard disaggregation. Application to the metropolitan region of Lisboa, Portugal. *Assessing and Managing Earthquake Risk*, 449 - 462.
- Campos Costa, A., Sousa, M. L., Carvalho, A. (2008). Seismic Zonation for Portuguese National Annex of Eurocode 8. *Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng. Beijing, China*, pp. 8–15, 2008.
- Carrilho, F., Teves Costa, P., Morais, I., Pagarete, J., Dias, R. (2004a). GEOALGAR Project: First Results on Seismicity and Fault-plane Solutions. *Pure appl. Geophys.*, 161, 589–606.
- Carrilho, F., Nunes, J., Pena, J., Senos, M. (2004b). Catálogo sísmico de Portugal Continental e Região Adjacente para o período de 1970-2000. *Publ. IM, ISBN 972-9083-12-06*, 227 pp.
- Carrilho, F. (2005). Estudo da Sismicidade da Zona Sudoeste de Portugal continental. Dissertação de mestrado, *Fac. Ciências da Univ. de Lisboa*, 160 p.
- Carrilho, F., Pena, J. A., Nunes, J. C. (2010). Sismicidade. Capítulo 3, do livro *Estudo do Risco Sísmico e de tsunamis no Algarve*, Edição: *Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC)*, pp. 28-43.
- Carvalho, A. (2007). Modelação Estocástica da Acção Sísmica em Portugal continental. Tese de doutoramento, *Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico*.
- Carvalho, A., Campos Costa, A. (2015). Impact of seismicity assumptions on seismic hazard for Portugal mainland. *Relatório LNEC 20/2015*.
- Carvalho, A., Malfeito, N. (2016). Períodos de recorrência de sismos para Portugal continental: uma análise crítica. *rpee | Série III | n.º 2 | novembro de 2016*.
- Carvalho, A., Malfeito, N. (2017). Períodos de recorrência de sismos para Portugal continental: uma análise crítica. *Relatório SPES (a publicar)*.
- Carvalho, E. C., Coelho, E., Campos Costa, A., Sousa, M. L., Candeias, P. (2001). Classificação tipológica do parque habitacional de Portugal continental para o estudo da sua vulnerabilidade sísmica. *5ESES. LREC, Ponta Delgada*. pp. 199-212.
- Carvalho, E. C., Coelho, E., Campos Costa, A., Sousa, M. L., Candeias, P. (2002a). Vulnerability evaluation of residential buildings in Portugal. *12ECEE. Londres. Elsevier Science Ltd. Artigo nº 696*.
- Carvalho, E. C., Campos Costa, A., Sousa, M. L., Martins, A., Serra, J. B., Caldeira, L., Coelho, A. G. (2002b). Caracterização, vulnerabilidade e estabelecimento de danos para o planeamento de emergência sobre o risco sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vinhos e Torres Vedras. *Relatório final. Relatório 280/02 – G3ES. LNEC, Lisboa*.
- Cauzzi, C., Faccioli, E. (2008). Broadband (0.05 to 20s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *Journal of Seismology*, 2008, volume 12, pages 453-475.
- Chiou, B., Youngs, R. (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, Volume 24, No. 1, pages 173-215.
- Coelho, E., (2003). Reabilitação sísmica de estruturas de edifícios. *3º ENCORE. LNEC, Lisboa*. pp. 1119-1128.

- Cornell, C. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 58, n. 5, pp. 1583–1606.
- Costa, S. (2008). Avaliação da vulnerabilidade sísmica do parque edificado da avenida Dr. Lourenço Peixinho - Aveiro. Tese de Mestrado da FEUP, Porto.
- Dias, R., Cabral, J. (2002). Neotectónica da região do Algarve. *Comun. Inst. Geol. Mineiro* 89, 193-208.
- Di Pasquale, G., Orsini, G. (1997). Proposta per la valutazione di scenari di danno conseguenti ad un evento sismico a partire dai dati ISTAT. *Proceedings 8th National Conference on Earthquake Engineering in Italy*, Taormina, September, 1997.
- FEMA & NIBS (1999). Earthquake loss estimation methodology – HAZUS 99. Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences, Washington DC.
- Ferreira, C. (2008). Vulnerabilidade sísmica do parque edificado na cidade de Aveiro. Tese de Mestrado da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Ferreira, M., Proença, J., Oliveira, C. (2010). Avaliação do risco sísmico nos equipamentos de ensino da região do Algarve. *Sísmica 2010 - 8º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica*.
- Field, E. H., Jordan, T. H., Cornell, C. A. (2003) OpenSHA: a developing community-modeling environment for seismic hazard analysis. *Seismol Res Lett* 74:406–419.
- Giardini, D. (1999). The global seismic hazard assessment program (GSHAP). *Annali di Geofisica*, 42, 957 - 974.
- Giardini, D., Woessner, J., Danciu, L., Cotton, F., Crowley, Grünthal, H. G., Pinho, R., Valensise, G., Akkar, S., Arvidsson, R., Basili, R., Cameelbeck, T., Campos Costa, A., Douglas, J., Demircioglu, M. B., Erdik, M., Fonseca, J., Glavatovic, B., Lindholm, C., Makropoulos, K., Meletti, C., Musson, R., Ptilakis, K., Rovida, A., Sesetyan, K., Stromeyer, D., Stucchi, M. (2013). *Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): Online Data Resource*, doi:10.12686/SED-00000001-SHARE.
- Giardini, D., NERA team (2014). *Network of European Research Infrastructures for Earthquake Risk Assessment and Mitigation. Final report*.
- Giovinazzi, S., Lagomarsino, S. (2003). Seismic risk analysis: a method for the vulnerability assessment of built-up areas. *European Safety and Reliability Conference*. Maastricht.
- Giovinazzi, S., Lagomarsino, S. (2004). A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings. *13WCEE*. Vancouver. Artigo nº 896.
- Gràcia, E., Dañobeitia, J., Vergés, J., PARSIFAL Team (2003). Mapping active faults offshore Portugal (36°N–38°N): implications seismic hazard assessment along the southwest Iberian margin. *Geology* 31 (1): 83-86.
- Gutscher, M., Malod, J., Rehault, J.- P., Contrucci, I., Klingelhoefer, F., Mendez Víctor, L., Spakman, W. (2002). Evidence for Active Subduction Beneath Gibraltar. *Geology* 30/12, 1071-1074.
- Gutenberg, B., Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 34, n. 4, pp. 185–188.

- INE, (2012). Censos 2011 Resultados definitivos – Portugal, Publicações INE, Instituto Nacional de Estatística, Lisboa.
- Jeremias, F. T., Carvalho, A., Coelho, A. G., Campos Costa, A. (2012). Estudos sísmológicos para definição das ações sísmicas para o local de implantação do aproveitamento hidroelétrico de Foz Tua. XIII Congresso Nacional de Geotecnia, 16 p.
- Kyriazis, P., Syner-G team (2013). Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain. Final report. Aristotle University of Thessaloniki, Department of Civil Engineering, Thessaloniki – Greece.
- Kaynia, A. (2013). D8.10 - Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Kramer, S. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall series in Civil Eng. and Eng. Mechanics, New Jersey.
- Maia, L. (2011). Cenários sísmicos em Ponta Delgada. Tese de Doutoramento da Faculdade Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Marques, M., Castro, J., Silva, V., Carvalho, A., Monteiro, R. (2014). Risco sísmico em Portugal – Desenvolvimentos do projecto PRISE. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas (JPEE 2014).
- Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure, P., RISK-UE team (2004). “The European Risk- E Project: An advanced approach to earthquake risk scenarios”, 13^a Conferência Mundial de Engenharia Sísmica, Vancouver, B. C., Canadá.
- Mouroux, P., Brun, B. (2006). Presentation of RISK-UE Project. Bull Earthquake Engineering, 4, 323–339.
- NP EN 1998-1 (2010). Eurocódigo 8 - Projeto de Estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios, Inst. Port. da Qual., vol. 1.
- Oliveira, C. (2005). Description of the 1755 Lisbon earthquake, its extension, causes and effects. The tremblor. The tsunami. The fire. IABSE Symposium. Structures and Extreme Events. Lisboa.
- Pagani, M., Monelli, D., Weatherill, G. A., Garcia, J. (2014). The OpenQuake-engine Book: Hazard. Global Earthquake Model (GEM) Technical Report 2014-08, doi: 10.13117/-GEM.OPENQUAKE.TR2014.08, 67 pages.
- Pinho, R. (2010). The global earthquake model: calculating and communicating seismic risk. The GEM Foundation, Itália.
- Ribeiro, A., Cabral, J., Baptista, R., Matias, L. (1996). Stress pattern in Portugal mainland and the adjacent Atlantic region, West Iberia. Tectonics, 15 (2), pp. 641-659.
- Rodrigues, I., Sousa, M. L., Carvalho, A., Carrilho, F. (2009). Parâmetros das leis de frequência-magnitude para as novas zonas de sismogénese delineadas para a região do Algarve. APMG 2009, 6.º Simpósio de Meteorologia e Geofísica / 10º Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia, Costa da Caparica, Portugal.

- Rodrigues, I. (2010). Estabelecimento de cenários sísmicos para a região do Algarve com base em metodologias probabilísticas. Relatório de estágio. Relatório 33/2010 – NESDE, LNEC, Lisboa.
- Rodrigues, J., Carvalho, A., Delfim, R., Gomes, R. (2014). Leis de atenuação sísmica para Portugal continental considerando o tipo de terreno. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas (JPEE 2014).
- Rosas, F., Duarte, J., Terrinha, P., Valadares, V., Matias, L. (2009). Morphotectonic characterization of major bathymetric lineaments in Gulf of Cadiz (Africa–Iberia plate boundary): Insights from analogue modelling experiments. *Marine Geology* 261 (2009) 33–47.
- Sartori, R., Torelli, L., Zitellini, N., Peis, D., Lodolo, E. (1994). Eastern segment of the Azores–Gibraltar line (central-eastern Atlantic): An oceanic plate boundary with diffuse compressional deformation. *Geology*, 22, pp. 555-558.
- Senos, M., Carrilho, F. (2003). Sismicidade de Portugal continental. *Física de la Tierra*, 15, 93-110. ISSN: 0214-4557.
- Silva, V., Crowley, H., Pagani, M., Monelli, D., Pinho, R. (2013). Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Nat Hazards*, DOI 10.1007/s11069-013-0618-x.
- Silva, V., Crowley, H., Varum, H., Pinho, R. (2015). Seismic risk assessment for mainland Portugal. *Bull Earthquake Eng* (2015) 13:429–457. DOI 10.1007/s10518-014-9630-0.
- Sousa, M. L. (1996). Modelos probabilistas para avaliação da casualidade sísmica em Portugal continental. Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- Sousa, M. L., Carvalho, E. C., Oliveira, C. S. (2000). Risco sísmico em Portugal. *Bolsa dos Seguros. Revista de Seguros e Pensões*. Ano III, nº 8, março, Lisboa. pp. 22-26.
- Sousa, M. L., Campos Costa, A., Carvalho, A., Coelho, E. (2004). An automatic seismic scenario loss methodology integrated on a Geographic Information System. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Artigo nº 2526, Vancouver, B.C., Canada.
- Sousa, M. L. (2006). Risco sísmico em Portugal continental. Tese de Doutoramento da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Sousa, M. L., Campos Costa, A., Coelho, E. (2006). LNECloss Simulador de Cenários Sísmicos integrado num Sistema de Informação Geográfica. *Engenharia e Vida* Ano II, nº21, pp.28-33.
- Sousa, M. L. (2010). Vulnerabilidade sísmica e danos no parque hoteleiro da região do Algarve. *Sísmica 2010 - 8º congresso de sismologia e engenharia sísmica*.
- Spence, R. (2007). Earthquake disaster scenario prediction and loss modelling for urban areas. LESSLOSS Report - 2007/07, IUSS press, Pavia, Itália.
- Terrinha, P., Pinheiro, L. M., Henriot, J. P., Matias, L., Ivanov, M. K., Monteiro, J. H., Akhmetzhanov, A., Volkonskaya, A., Cunha, T., Shaskin, P., Rovere, M. (2003). Tsunamigenic-seismogenic structures, neotectonics, sedimentary processes and slope instability on the southwest Portuguese Margin. doi:10.1016/S0025-3227(02)00682-5. *Marine Geology* 3266 1-19.

- Terrinha, P., Rocha, R. B., Rey, J., Cachão, M., Mouras, D., Roque, C., Martins, L., Valadares, V., Cabral, J., Azevedo, M. R., Barbero, L., Clavijo, E., Dias, R. P., Matias, H., Madeira, J., Silva, C. M., Munhá, J., Rebelo, L., Ribeiro, C., Vicente, J., Noiva, J., Youbi, N., Bensalah, M. K. (2006). A Bacia do Algarve: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In: *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*, (Dias R., Araújo, A., Terrinha, P. e Kullberg, J.C., Editores), Univ. Évora, pp. 247-316.
- Terrinha, P., Matias, L., Vicente, J., Duarte, J., Luís, J., Pinheiro, L., Lourenço, N., Diez, S., Rosas, F., Magalhães, V., Valadares, V., Zitellini, N., Roque, C., Mendes Víctor, L., MATESPRO Team (2009). Morphotectonics and strain partitioning at the Iberia–Africa plate boundary from multibeam and seismic reflection data. *Mar. Geol.* 267, 156–174.
- Teves Costa, P., Viegas, G. (2004). Estudo da perigosidade sísmica na região do Vale Inferior do Tejo. 4ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica. Figueira da Foz.
- Udias, A. (1999). *Principles of Seismology*. University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Vicente, R. (2008). Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra. Tese de Doutoramento da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Vicente, R., Ayala, D., Ferreira, T., Varum, H., Costa, A., Mendes da Silva, J. A. R., Lagomarsino, S. (2014). Seismic Vulnerability and Risk Assessment of Historic Masonry Buildings, capítulo 11 do livro: “Structural Rehabilitation of Old Buildings”, editores: Costa, A., Guedes, J. M., Varum, H., Springer.
- Vilanova S. (2004). Sismicidade e perigosidade sísmica do vale inferior do Tejo. Tese de Doutoramento em Engenharia Física Tecnológica. IST, UTL. Lisboa.
- Vilanova, S., Fonseca, J. (2007). Probabilistic seismic-hazard Assessment for Portugal. *Bulletin of the Seismological of America*, 97, 1702 - 1717.
- Woessner, J., Laurentiu, D., Giardini, D., Crowley, H., Cotton, F., Grünthal, G., Valensise, G., Arvidsson, R., Basili, R., Demircioglu, M. B., Hiemer, S., Meletti, C., Musson, R. W., Rovida, A. N., Sesetyan, K., Stucchi, M. (2015). The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results. *Bull. Earthq. Eng.* Vol. 13. pp. 3553-3596.
- Zhao, J., Akihiro Asano, J., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H., Somerville, P., Fukushima, Y., Fukushima, Y. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume 96, No. 3, pages 898-913, doi: 10.1785/0120050122.
- Zitellini, N., Chierici, F., Sartori, R., Torelli, L. (1999). The tectonic source of the 1755 Lisbon earthquake and tsunamis. *Annali Geofisica* 42/1, 49-55.
- Zitellini, N., Mendes, L. A., Cordoba, D., Danobeitia, J., Nicolich, R., Pellis, G., Ribeiro, A., Sartori, R., Torelli, L., Bartolome, R., Bortoluzzi, G., Calafato, A., Casoni, L., Chierici, E., Corela, C., Correggiari, A., Vedova Delia, B., Gracia, E., Jornet, P., Landuzzi, M., Ligi, M., Magagnoli, A., Marozzi, G., Matias, L., Penitenti, D., Rodriguez, P., Rovere, M., Terrinha, P., Vigliotti, L., Zahinos Ruiz, A. (2001). Source of 1755 Lisbon earthquake and tsunamis investigated, *EOS* 82/26, 282-285.

Zitellini, N., Gràcia, E., Matias, L., Terrinha, P., Abreu, M. A., DeAlteriis, G., Henriët, J. P., Dañobeitia, J. J., Masson, D. G., Mulder, T., Ramella, R., Somoza, L., Diez, S. (2009). The quest for the Africa-Eurasia plate boundary west of the Strait of Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*, 280, 1-4, pp: 13-50.

Zuccaro, G., Papa, F. (2002). Method of seismic vulnerability and exposure assessment at national scale – the Italian case. *12th ECEE*, 2002, paper reference 698.

Anexos

Anexo A

Mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental para uma probabilidade de excedência de 10% em 50 anos

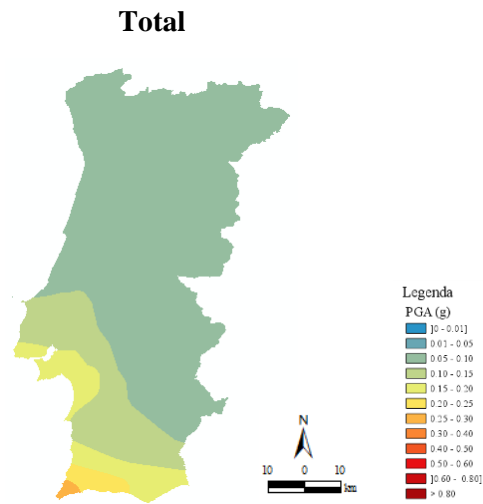


Figura A.1: Mapa de perigosidade sísmica com o modelo EC8 e a Hipótese 1 (Ambraseys *et al.* (1996) para ambiente tectónico continental e Carvalho (2007) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

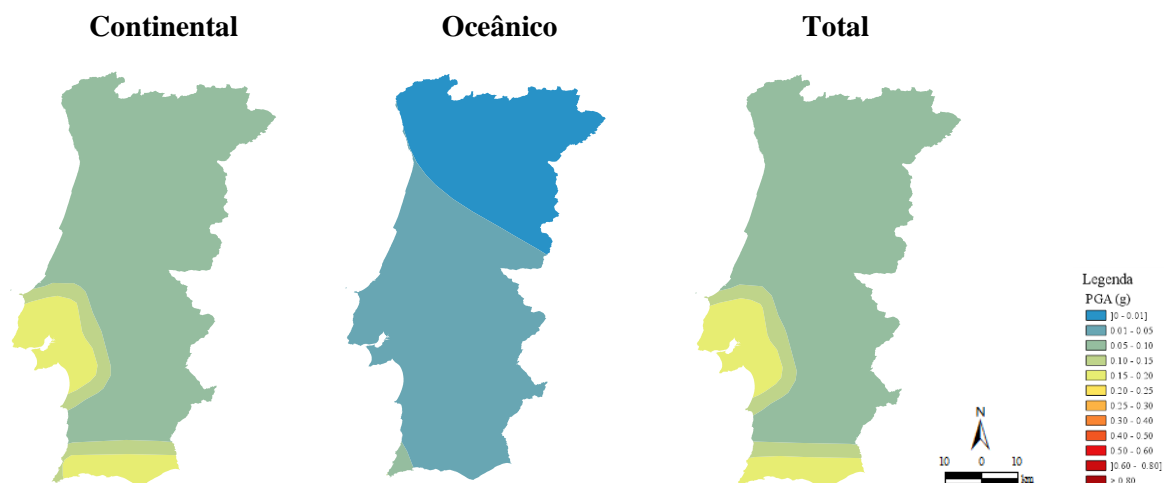


Figura A.2: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo EC8 e a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

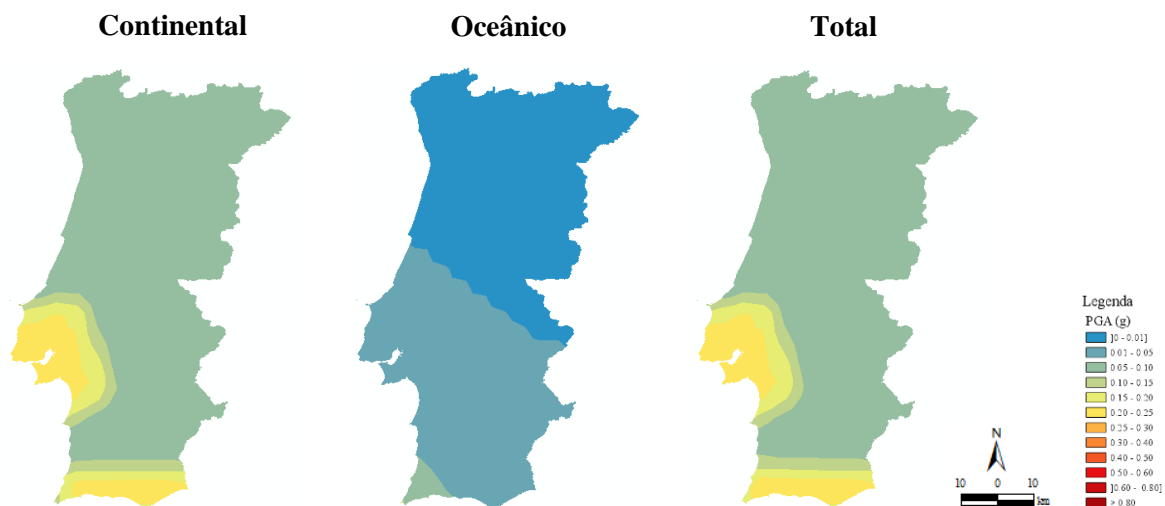


Figura A.3: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo EC8 e a Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

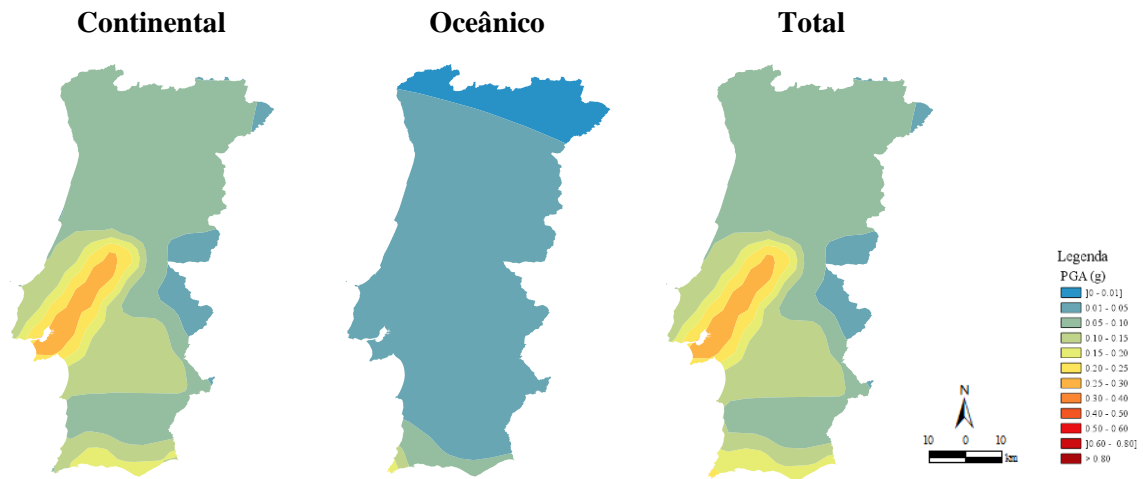


Figura A.4: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo ERSTA e a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

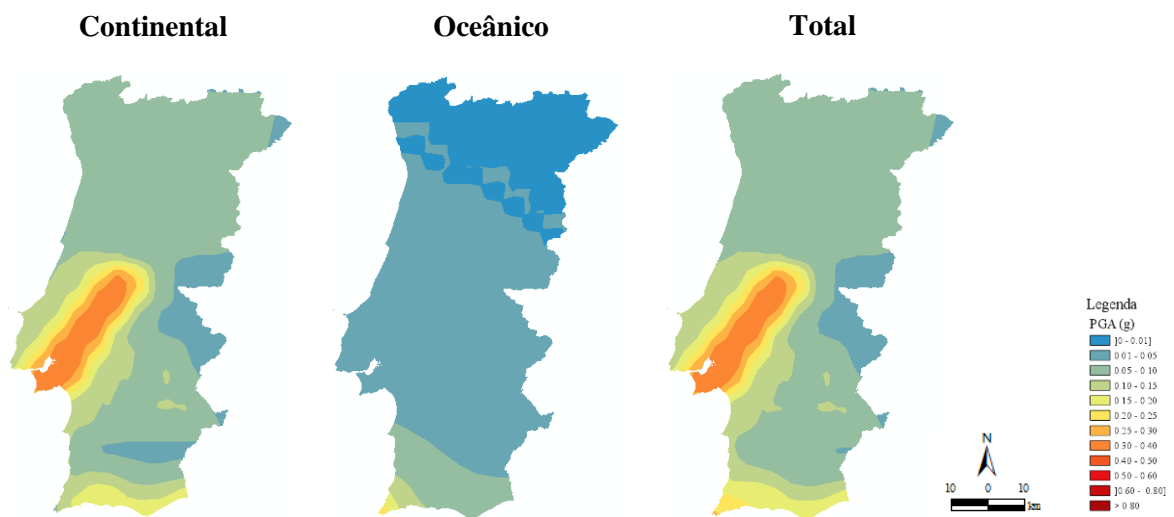


Figura A.5: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo ERSTA e a Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

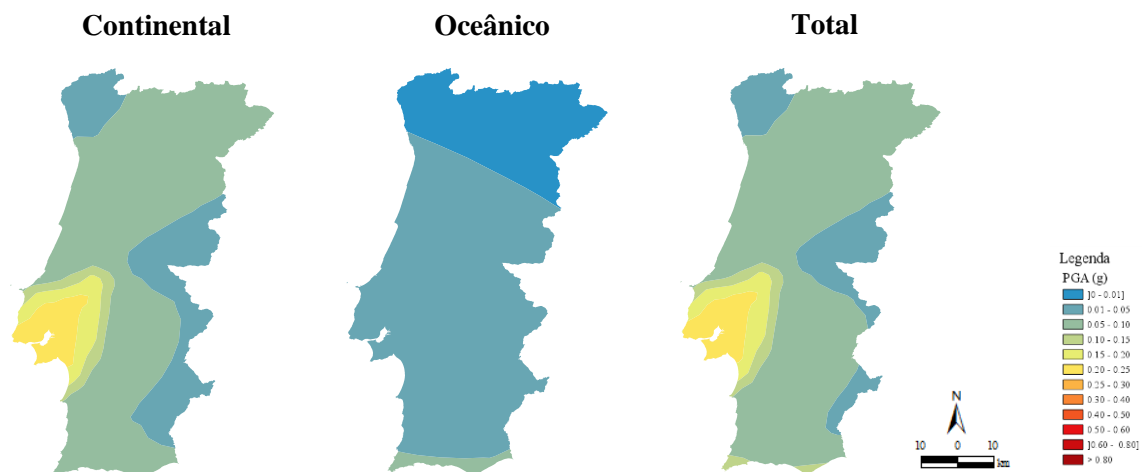


Figura A.6: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo SHARE e a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

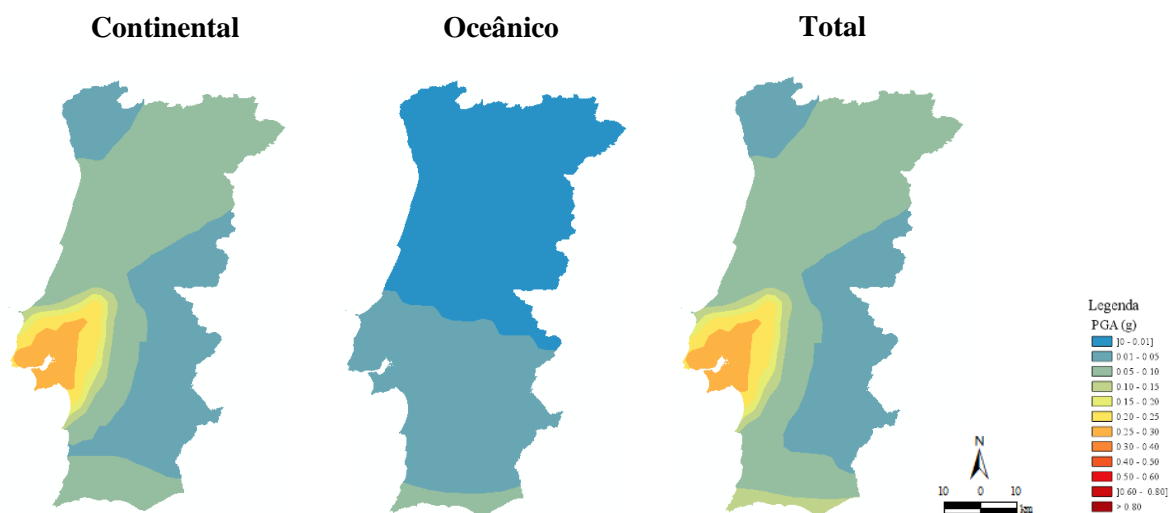


Figura A.7: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo SHARE e a Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

Anexo B

Mapas de perigosidade sísmica para Portugal continental para uma probabilidade de excedência de 2% em 50 anos

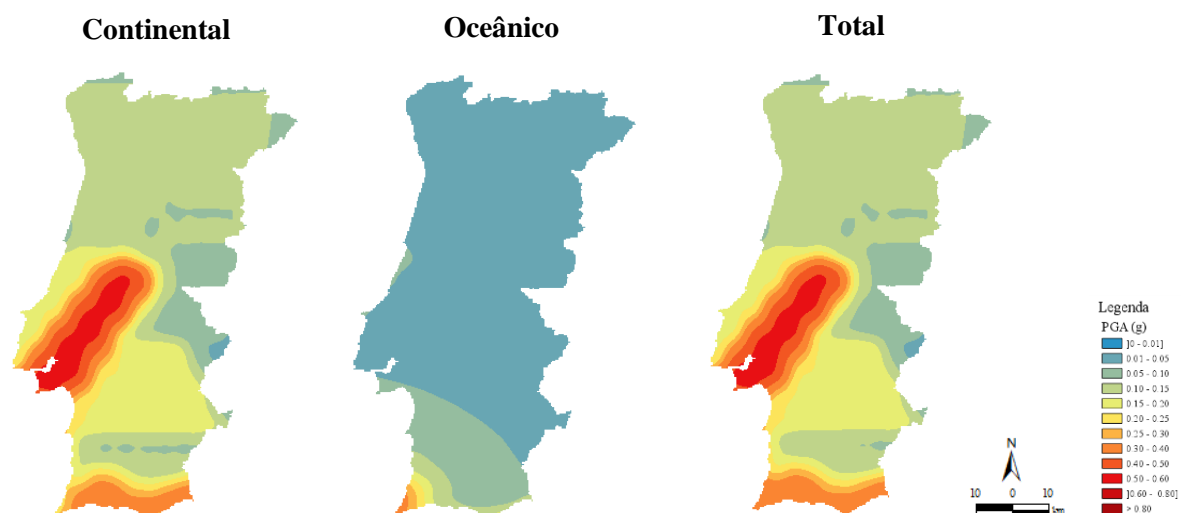


Figura B.1: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo ERSTA e a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

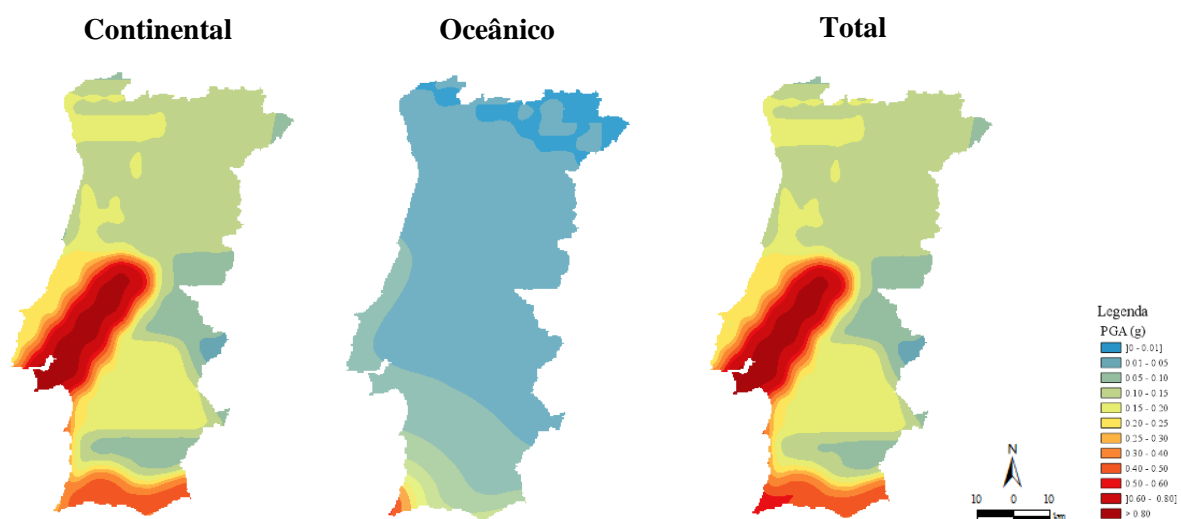


Figura B.2: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo ERSTA e a Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

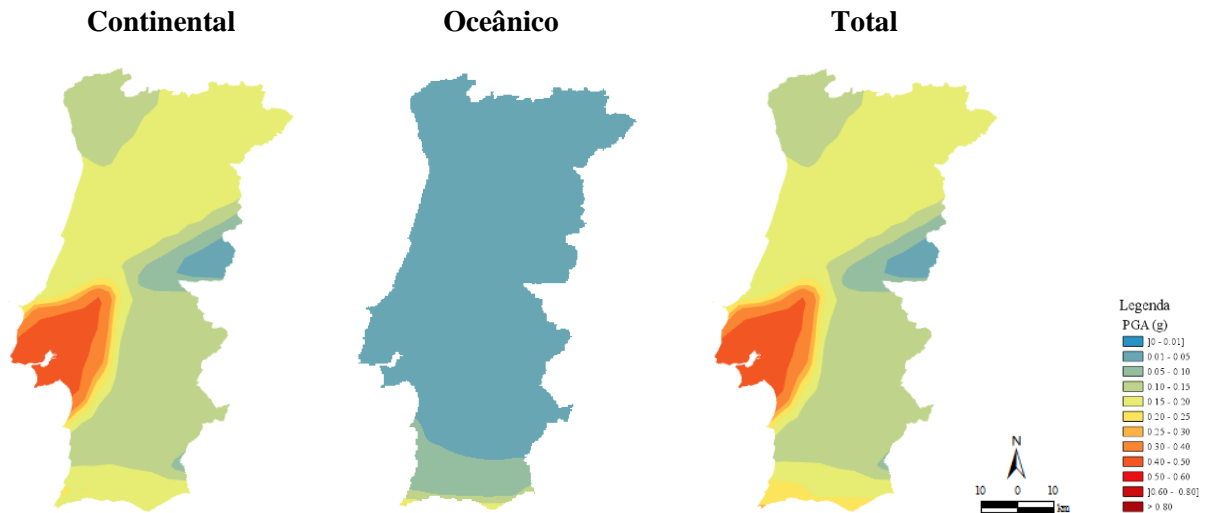


Figura B.3: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo SHARE e a Hipótese 2 (Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Atkinson & Boore (2006), Campbell (2003) para ambiente tectónico continental e Akkar & Bommer (2010), Cauzzi & Faccioli (2008), Chiou & Youngs (2008), Zhao *et al.* (2006) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

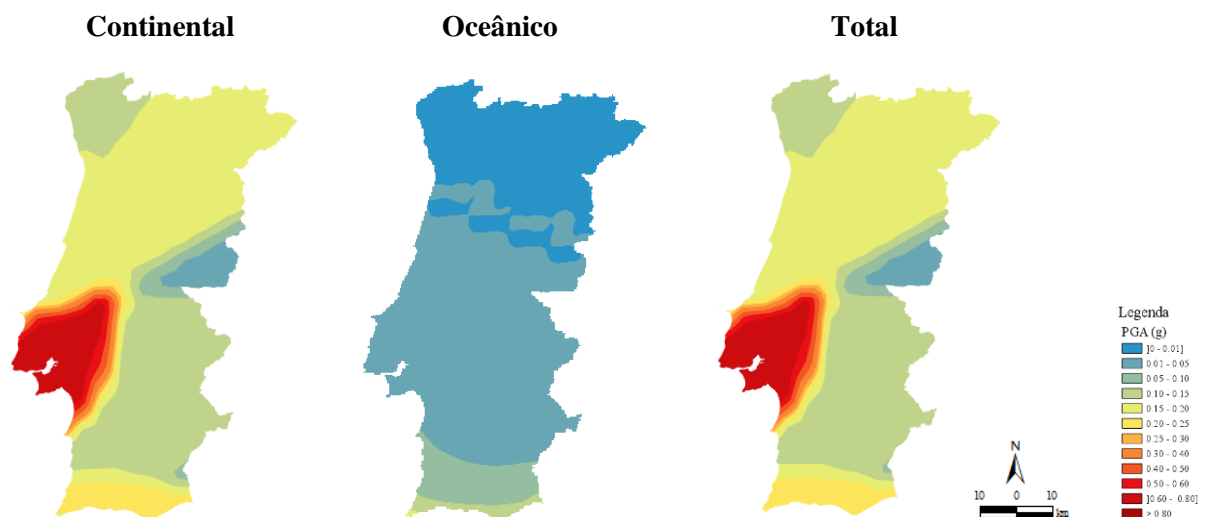


Figura B.4: Mapas de perigosidade sísmica com o modelo SHARE e a Hipótese 3 (Atkinson & Boore (2006) para ambiente tectónico continental e Rodrigues *et al.* (2014) para ambiente tectónico oceânico), de acordo com a Tabela 4.4.

